

沼液施用对干旱胁迫下玉米幼苗 生长和生理特性的影响

杨建霞^{1,2}, 毛宁^{1,2}, 张雪娟², 魏丽娜²

(1 甘肃省陇东生物资源保护利用与修复重点实验室, 甘肃庆阳 745000; 2 陇东学院 生命科学与技术学院, 甘肃庆阳 745000)

摘要: 为了探明干旱胁迫下沼液对玉米幼苗抗旱、光合生理、形态的缓解效应, 以中度抗旱玉米杂交种‘先玉 335’和较强抗旱杂交种‘中单 2 号’为材料, 采用 10% 聚乙二醇-6000 模拟干旱胁迫, 研究 50% 沼液根部浇灌处理对干旱胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响。结果表明, 沼液根部施用可以显著提高两品种玉米的抗旱性, 有效缓解干旱胁迫对玉米幼苗根系和地上部生长的抑制作用, 促进两品种玉米幼苗生长和提高根系活力, 降低根冠比, 且‘先玉 335’的变幅更大; 同时显著提高两品种叶片 SOD、POD 和 CAT 活性以及可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量(‘中单 2 号’的 CAT 除外), 降低 MDA 含量, 且对‘中单 2 号’的影响更显著; 沼液根施还可以显著提高干旱胁迫下两品种叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r), 降低气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i), 但‘中单 2 号’的 T_r 和 G_s 除外, 同时使两品种叶片叶绿素含量和水分利用效率(WUE)均显著增加。可见, 沼液根施处理可以有效改善干旱胁迫下玉米幼苗的光合能力, 显著提高幼苗抗氧化酶活性和渗透调节物质的含量, 减轻膜脂过氧化程度, 有效缓解干旱胁迫对 2 种不同抗旱性玉米幼苗的生长抑制, 从而增强玉米耐受干旱胁迫的能力, 且对‘中单 2 号’的缓解效果更明显。

关键词: 沼液; 干旱胁迫; 玉米; 幼苗生长; 生理特性

中图分类号: S513; X712.3 **文献标志码:** A

Effects of Biogas Slurry Application on Physiological Characteristics and Growth of Maize Seedlings under Drought Stress

YANG Jianxia^{1,2}, MAO Ning^{1,2}, ZHANG Xuejuan², WEI Li'na²

(1 Key Laboratory for Protection and Utilization of Longdong Bio-resources in Gansu Province, Qingyang, Gansu 745000, China; 2 College of Life Science and Technology, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: In order to clarify the effect of biogas slurry on drought resistance, photosynthetic physiology, and morphology of maize seedling under drought stress, medium resistance-drought maize hybrids ‘Xianyu 335’ and highly resistant-drought maize hybrids ‘Zhongdan 2’ were used as materials, and the treatment of root irrigation with 50% biogas slurry under 10% PEG-6000 simulated drought stress was designed, to study the effects of biogas slurry on the growth and physiological characteristics of maize seedlings under drought stress. The results showed that 50% biogas slurry could significantly improve the drought resistance of two maize hybrids, reduce the inhibition of seedlings and root growth of two maize hybrids by drought stress, promote the growth and root activity of two maize hybrids seedling, while decrease the root-top ratio under drought stress, but that of ‘Xianyu 335’ maize inbred line were changed even more between them. Biogas slurry could significantly increase the activities of SOD, POD, and CAT, besides the CAT activity of ‘Zhongdan 2’, moreover, further increase the content of soluble sugar, proline and soluble protein too, however, decrease the content of MDA in leaves of the two maize hybrids under

收稿日期: 2022-07-23; 修改稿收到日期: 2023-06-03

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(18JR3RM237); 兰州大学“细胞活动与逆境适应教育部重点实验室”开放基金项目(lzujbky-2020-kb05); 陇东学院青年科技创新项目博士研究专项(XYBE1602)

作者简介: 杨建霞(1972-), 女, 博士, 副教授, 主要从事植物分子生物学、药用植物活性成分研究。E-mail: yjxgansu08@163.com

drought stress, and those of ‘Zhongdan 2’ were changed even more. Biogas slurry could also significantly increase net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r), and decrease stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) in leaves of two maize hybrids under drought stress, except for the T_r and G_s of ‘Zhongdan 2’ maize inbred line. By now biogas slurry significantly increased the chlorophyll content and water use efficiency (WUE) in leaves of two maize hybrids. It was concluded that 50% biogas slurry root irrigation treatment could effectively improve photosynthetic capacity of maize seedlings, significantly increase antioxidant enzyme activity and osmotic substances content, alleviate peroxidation of membrane lipid, reduce the inhibition of growth of seedlings of two maize hybrids by drought stress. Thus, biogas slurry could enhance the drought resistance of maize, and this effect more visible in ‘Zhongdan 2’ maize inbred line, for its highly drought-resistance.

Key words: biogas slurry; drought stress; maize; seedling growth; physiological property

玉米是甘肃庆阳市重要的粮食作物和饲料作物,生产潜力大,经济效益高,具有食用、饲用等多种用途,在保障粮食安全方面具有重要战略地位^[1-2]。干旱是西北发展玉米生产的第一限制因素,随着全球气候的变化,干旱已成为对作物生长和粮食产量影响最严重的非生物胁迫因子之一^[2]。而庆阳地处黄土高原,气候介于干旱与半干旱之间,属温带草原气候,水分是影响当地作物生长最主要的环境因子,特别在6—7月干旱频发,是造成玉米减产的主要原因^[3]。因此,研究干旱胁迫下玉米形态、生理生化等变化特征,对探索作物抗旱途径、促进旱地作物生产具有重要意义,同时也为确保区域粮食安全和玉米绿色丰产增效提供理论依据。

沼液是禽畜粪便等有机物经厌氧发酵后的残留液体,除含有多种微量元素、有机质、氨基酸、维生素等外,还含有黄腐酸、丁酸、吡啶乙酸、脱落酸及各种水解酶等许多生物活性物质^[3-4]。因此,它在增强植物抗逆性、作物提质增产、种子浸种催芽、病虫害防治等方面具有重要作用^[5-6]。目前,已有许多学者对沼液在蔬菜、水果及农作物生产上的应用进行了大量研究^[4-5],发现施用沼液可明显提高黄瓜幼苗质量,改善黄瓜根系土壤基本化学性状^[4];也能够明显提高玉米产量和土壤肥力等^[5]。另外,也有资料表明施用沼液能够增强植物的抗逆性。例如,沼液联合丛枝菌根处理能够显著提高干旱胁迫条件下甘草的生物量和叶绿素含量以增强其抗旱性^[7];沼液浸种能一定程度上提高美国香豌豆的干旱耐受程度^[8];沼液施用能够显著减轻干旱胁迫对南丰蜜桔造成的落果现象^[9];沼液抗旱剂不同稀释倍数处理能够显著增加大豆开花期叶片相对含水量(RWC),降低大豆叶片的蒸腾速率^[10]。

虽然已有研究证实沼液在改善植物抗旱性方面具有重要作用,也报道了沼液施用对玉米产量和光

合性能的影响^[11]以及干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响^[12],但目前仍缺少沼液对玉米响应干旱胁迫的相关研究报道。因此,本试验以2个抗旱性有差异的玉米品种为材料,采用聚乙二醇(PEG)模拟干旱胁迫条件,研究沼液对干旱胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响,旨在探讨沼液是如何通过改变玉米幼苗的生长和生理指标进而提高其抗旱性,这对于揭示沼液在增强植物抗旱性的生理机制方面具有重要的参考价值,并为提高玉米的节水效应提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料和试剂

供试玉米材料为抗旱较强的杂交种‘中单2号’(Mo17×自330^[13],母本Mo17由武威种子站惠赠)和抗旱中等的杂交种‘先玉335’(PH6WC×PH4CV^[14],母本PH6WC购自河南美农汇农资公司);聚乙二醇-6000(AR);沼液产自甘肃省庆阳市镇原县鸿翔养殖专业合作社的中型沼气工程,沼液发酵原料为牛粪,取自正常产气3个月以上的沼气池,将沼液过滤后使用。沼液肥效成分为:有机质1.2%,总养分0.8%,总氮0.2%,磷0.2%,钾0.4%,pH 7.2,总铅(Pb)(以烘干基计)20 mg/kg(国际标准≤50),其他常见几种重金属均未检测到,由中华全国供销合作总社兰州化肥农药农膜商品质量监督检验测试中心提供。

1.2 材料培养与处理

2018年3—9月在生农科技园人工智能温室中进行盆栽试验。挑选‘中单2号’和‘先玉335’饱满种子各100粒分别放于烧杯中,经10%次氯酸钠溶液表面消毒10 min后蒸馏水反复冲洗3~4次,将2种玉米种子用灭菌蒸馏水浸泡过夜,并分别转移至底部铺有滤纸(事先经蒸馏水浸湿)的发芽盒中,

48 h 后将发芽种子用消毒的镊子移栽到直径 14 cm,高 50 cm 的花盆(基质为营养土和珍珠岩按 3:1 混匀)中,并放入光照培养箱于(25±1) °C、16 h/8 h(光/暗)、1 000 lx 条件下培养,期间每隔 3~5 d 浇水和 Hoagland's 营养液各 1 次,保持盆中营养土湿润即可,待幼苗长至四叶一心期时挑选长势一致的幼苗进行试验处理。

根据前期的试验结果,本试验中选用 10% PEG-6000 模拟中度干旱胁迫,沼液根施浓度选用 50%。试验共设 3 种处理:蒸馏水处理(对照,CK)、10% PEG-6000 处理(D)、50% 沼液+10% PEG-6000 处理(BS+D)。每个重复选择 5 株幼苗,共设 3 次重复。其中 BS+D 组先用 50% 沼液 50 mL 浇灌幼苗根部预处理 1 d,而 CK 和 D 组均先用 50 mL 蒸馏水浇灌幼苗根部进行预处理 1 d。待预处理结束后,CK 组用 50 mL 蒸馏水根部浇灌处理,其余 2 组均用 50 mL 10% PEG-6000 溶液根部浇灌处理,胁迫处理 7 d 后取样,测定各项生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合气体交换参数

选择玉米幼苗从上数第 3 片完全展开叶片于晴天上午 9:00—11:30,采用 LI-6400 型便携式光合仪(LI-COR 公司),在温度为 25°C、光照强度为 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及大气 CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 条件下,在 200 m 范围内无人的空旷地方,测定叶片净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),每个处理重复测定 3 次。计算叶片瞬时水分利用效率(P_n/T_r)

1.3.2 生理指标

取各处理 1 g 叶片于预冷的研钵内,加入 10 mL 50 mmol/L、pH 7.8 的磷酸缓冲液(PBS),研磨成匀浆后转入 10 mL 离心管中,在 4 °C、4 000 r/min 条件下离心 15 min,吸取上清液置 4 °C 冰箱保存,用于丙二醛(MDA)、脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量等的测定。

MDA 含量:采用硫代巴比妥酸显色法测定^[15],随机取玉米幼苗叶片 8~10 片进行上述处理后,用紫外-可见分光光度计(UV-5100B,上海元析仪器公司)分别测定 532,600,450 nm 波长下的吸光度值 D_{532} 、 D_{600} 和 D_{450} ,依据公式 $[6.45 \times (D_{532} - D_{600}) - 0.56 \times D_{450} \times \text{提取液体积}/\text{植物组织鲜重}]$ 计算丙二醛含量($\mu\text{mol}/\text{g}$),每个处理 3 次重复。

脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量:叶片脯氨酸含量采用磺基水杨酸提取,茚三酮比色法测定,可

溶性糖含量参考蒽酮比色法测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定,每个处理重复 3 次,以上均参照张志良等^[15]所描述方法并稍作修改。

抗氧化酶活性:称取各处理 1 g 叶片于预冷的研钵内,加入 10 mL 50 mmol/L、pH 7.8 PBS 缓冲液在冰浴上研磨成浆,在 4 °C、10 000 r/min 下离心 15 min,吸取上清液保存到 4 °C 冰箱待测。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定,以上均参照李合生^[16]所描述的方法,每个处理测量 3 次重复。

叶片叶绿素 SPAD 值、氮元素含量及叶面温度:采用植物养分测定仪(TYS-3N,浙江托普仪器)测量叶绿素 SPAD 值、叶片氮元素、叶面温度。打开机器,将植物养分测定仪测量杆放在幼苗叶面,并按下测量杆 2~3 s,显示器会自动读出叶片的叶绿素 SPAD 值、氮元素含量及叶面温度,并记录相关数据。

各处理选择长势一致的植株 10 株,每株选择 8~10 片全展叶,测量部位应尽量避免叶片边缘或叶片主脉,从叶片基部到叶尖,等间距选取 5 个点进行读数,一般每片叶测量 3~5 次,最后取平均值记录,每个处理重复测量 3 次。

1.3.3 幼苗生长指标

各个处理选择无病虫害、长势健壮的植株 10 株,分别测量苗高、茎粗、叶面积。

苗高、茎粗:胁迫处理 7 d 后每个处理选取 10 株幼苗用卷尺测量苗高、游标卡尺测量茎粗。每个处理重复测量 3 次。

叶面积:采用 YMJ-B 型便携式叶面积测定仪(浙江托普仪器)测定,打开机器,调整机器空白 3 次。各处理选择长势一致的植株 10 株,每株挑选 8~10 片全展叶测量,叶片位置尽量避免叶边缘和叶主脉^[15]。每片叶读数 3~5 次,每个处理重复测量 3 次。

叶片干鲜比:每种处理挑选 10 株生长良好的玉米植株,分析天平称量地上部和地下部干、鲜质量,超纯水冲洗干净后擦干,将植株样品于 105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干至恒重^[16],待叶片烘干冷却后称取叶片干重,据公式计算叶片的干鲜比(叶片干重/叶片鲜重)。

根长、须根数:用卷尺测量玉米主根的纵向长度,每个处理挑选长势一致的 5 株测量,每个处理重复测量 3 次。须根数采用直接计数法,每个处理挑选长势一致的 10 株测量,每个处理 3 次重复。

根冠比:称取植株根系干重与地上部干重,并计

算根冠比(根系干重/地上部干重)。

根系活力:参照李合生^[16]方法,用 TTC 比色法测定根系的根系活力。

1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 对数据进行分析,采用 Duncan 法和单因素方差分析进行数据差异显著性检验($P < 0.05$),利用 Excel 2010 软件作表,图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗生长的影响

由表 1 可知,在 D 处理下,与 CK 相比,两品种玉米幼苗的苗高、茎粗、叶面积均不同程度降低,其中‘先玉 335’降幅更大,并均达到显著水平,‘中单 2 号’的苗高、叶面积也降低显著;与 D 处理相比,在 BS+D 处理下两品种玉米幼苗的苗高、茎粗、叶面积均显著增大,并超过 CK 水平,其中‘先玉 335’分别增加 38.7%、28.6%和 30.6%,‘中单 2 号’分别增加 36.8%、43.6%和 28.2%。‘先玉 335’和‘中单 2 号’的叶片干鲜比在 D 处理下与 CK 均无显著差异,但在 BS+D 处理下分别比 D 处理显著增加 50%和 25%。这表明沼液能够有效缓解干旱胁迫对玉米苗高、茎粗、叶面积及叶片干鲜重比的抑制作用,尤其对抗旱中等的‘先玉 335’幼苗生长抑制的缓解效果更显著(茎粗除外)。

同时,表 1 显示,‘先玉 335’和‘中单 2 号’幼苗

的叶绿素相对含量(SPAD 值)在 D 处理下分别比 CK 显著下降 10.6%和 5.8%,在 BS+D 处理下又分别比 D 处理显著增加 10.4%和 5.8%,并恢复至对照水平。两品种叶片氮元素含量在 D 处理下变化不明显,但在 BS+D 处理下均显著高于 D 处理和 CK(‘先玉 335’的除外)。(‘先玉 335’和‘中单 2 号’叶面温度在 D 处理下分别比 CK 显著升高 31.0%和 7.3%,但在 BS+D 处理下‘先玉 335’叶温比 D 处理轻微升高,而‘中单 2 号’的叶温比 D 处理显著降低,恢复至对照水平。说明抗旱性较强的‘中单 2 号’可以通过缓解叶面温度的升高,减小叶片的蒸腾效率,从而一定程度上增强其对干旱胁迫的耐受性。可见,沼液能够缓解干旱胁迫下玉米叶绿素 SPAD 值的下降和叶温升高,显著提高叶片氮含量,并且对‘中单 2 号’的缓解效应更显著。

另外,与 CK 相比,‘先玉 335’和‘中单 2 号’幼苗在 D 处理下根长均显著下降,根系活力和根冠比均显著增加,但须根数稍有降低;与 D 处理相比,BS+D 处理的‘先玉 335’和‘中单 2 号’根长分别增加 24.7%和 33.2%,根冠比分别下降 33.3%和 30.2%,须数分别增加 13.3%和 18.0%,均恢复至 CK 水平,而根系活力分别提高了 47.7%和 66.0%,并显著高于 CK(表 1)。表明沼液可以缓解干旱胁迫对根的生长抑制作用以及增强根系活力来提高玉米幼苗的耐旱性,且除根冠比外对抗旱性强的‘中单 2 号’影响更为显著。

表 1 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗生长的影响

Table 1 Effect of biogas slurry on growth of maize seedlings under drought stress

指标 Index	先玉 335 Xianyu 335			中单 2 号 Zhongdan 2		
	CK	D	BS+D	CK	D	BS+D
苗高 Seedling height/cm	32.53±1.20a	24.80±0.40b	34.40±0.90a	32.10±0.46b	26.90±0.42c	36.80±0.31a
茎粗 Stem diameter/cm	0.39±0.01b	0.35±0.03c	0.45±0.01a	0.41±0.02b	0.39±0.01b	0.56±0.04a
叶面积 Leaf area/cm ²	27.10±0.89a	21.90±0.70b	28.60±1.78a	28.80±0.27a	23.70±0.76b	29.20±0.86a
叶片干鲜比 Fresh/dry weight ratio	0.07±0.01b	0.06±0.01b	0.09±0.01a	0.07±0.01b	0.08±0.01b	0.10±0.01a
叶温 Leaf temperature/°C	12.90±0.46b	16.90±1.17a	17.90±1.98a	12.20±0.70b	13.10±0.50a	12.50±0.5b
叶片氮含量 Nitrogen content/(mg/g)	11.30±0.06b	11.00±0.07b	12.60±0.24a	11.30±0.20b	11.20±0.40b	12.80±0.50a
叶绿素相对含量 Chlorophyll SPAD	35.70±0.20a	31.90±0.20b	35.60±0.30a	41.30±0.40a	38.90±0.90b	43.90±1.20a
根长 Root length/cm	23.97±0.57a	16.90±0.40b	21.07±0.67ab	25.37±1.10a	19.87±0.65b	26.47±0.96a
须根数 The number of roots	11.33±0.58a	10.33±0.58ab	11.70±1.53a	13.67±0.58a	12.43±0.58b	14.67±1.53a
根冠比 Root-cap ratio	0.75±0.01b	1.02±0.12a	0.68±0.01b	0.76±0.01b	0.96±0.02a	0.67±0.02b
根系活力 Root activity/[μg/(g·h)]	1.22±0.108c	1.93±0.069b	2.85±0.027a	1.35±0.022c	2.32±0.096b	3.85±0.033a

注:CK. 对照,蒸馏水;D. 10% PEG-6000;BS. 50%沼液。下同。同行不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: CK. Control, water; D. 10% PEG-6000; BS. 50% biogas slurry. The same as below. Different lowercase letters in the same row are significant difference among treatments of the same variety ($P < 0.05$).

2.2 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

由图 1 可见,与 CK 相比,D 处理的‘先玉 335’和‘中单 2 号’叶片可溶性糖含量分别显著增加 21%和 38.61%(图 1,A),脯氨酸含量分别显著增加 32.3%和 17.6%(图 1,B),而 D 处理的可溶性蛋白含量在‘中单 2 号’中则显著下降 12.5%,在‘先玉 335’中下降不显著(图 1,C);与 D 相比,BS+D 处理的‘先玉 335’叶片可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量均不同程度提高,但仅脯氨酸增幅(11.57%)显著(图 1,B),而该处理‘中单 2 号’的上述指标则分别显著增加 28.2%、17.15%和 14.6%。说明玉米幼苗在干旱胁迫下可以通过增加可溶性糖、脯氨酸含量来降低细胞渗透势以适应外界环境的变化,而沼液施用能够不同程度提高干旱胁迫下两品种叶片中 3 种渗透调节物质含量,降低细胞水势,增强其对干旱环境的适应性,且对‘中单 2 号’的影响效果更为显著。

2.3 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

SOD 是生物体内清除自由基的首要抗氧化酶,

POD 和 CAT 是植物体内清除 H_2O_2 的抗氧化酶,其活性受 H_2O_2 诱导。干旱逆境条件下 POD 活性升高可以控制膜脂质过氧化作用,减少干旱对膜结构的伤害,增强植物自身的保护调节能力。

由表 2 可见,‘先玉 335’和‘中单 2 号’幼苗叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性在 D 处理下都比 CK 显著升高,‘先玉 335’的增幅分别为 34.3%、26.9%和 39%,‘中单 2 号’的增幅分别为 62.7%、78.2%和 38.2%。同时,与 D 处理相比,BS+D 处理的‘先玉 335’叶片 SOD、POD 和 CAT 活性分别提高 19.3%、20.7%和 42.3%,‘中单 2 号’的 SOD 和 POD 活性分别显著提高 26.5%和 73.6%,而 CAT 活性却显著降低。另外,‘先玉 335’和‘中单 2 号’叶片 MDA 含量在 D 处理下比 CK 分别显著提高 78.4%和 57.6%,在 BS+D 处理下分别比 D 处理显著下降 36.06%和 44.6%。说明沼液施用能够调节干旱胁迫下玉米叶片抗氧化酶活性,有效缓解干旱对植株的伤害,降低叶片中 MDA 含量,减小膜脂过氧化程度,以提高玉米幼苗的耐旱性,且对‘中单 2 号’的缓解效应更显著。

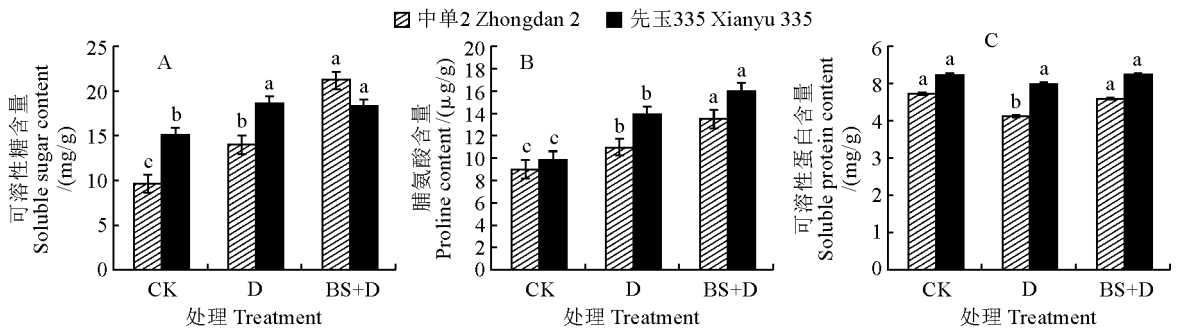


图 1 沼液对干旱胁迫下玉米叶片渗透调节物质含量的影响

Fig. 1 Effect of biogas slurry on organic matter contents of osmotic adjustment of maize seedlings under drought stress

表 2 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

Table 2 Effect of biogas slurry on antioxidant enzyme activities and malondialdehyde content of maize seedlings under drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	POD 活性 POD activity/(U/g)	CAT 活性 CAT activity/(U/g)	SOD 活性 SOD activity/(U/g)	丙二醛含量 Malondialdehyde content/(μ mol/g)
先玉 335 Xianyu 335	CK	8.04 ± 0.77c	5.15 ± 0.07c	6.13 ± 0.02b	11.25 ± 1.16c
	D	10.20 ± 0.59b	7.16 ± 0.02b	8.23 ± 0.06a	18.31 ± 0.04a
	BS+D	12.31 ± 1.33a	10.19 ± 0.10a	9.82 ± 0.01a	14.12 ± 0.78b
中单 2 号 Zhongdan 2	CK	7.16 ± 0.12c	6.52 ± 0.01b	7.06 ± 0.03c	9.72 ± 1.02b
	D	12.76 ± 0.08b	9.01 ± 0.04a	11.49 ± 1.16b	16.82 ± 0.95a
	BS+D	18.12 ± 1.22a	5.64 ± 0.02b	14.54 ± 0.04a	12.46 ± 1.10b

注:同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column are significant difference among treatments of the same variety ($P < 0.05$). The same as below.

2.4 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗叶片光合参数的影响

光合参数是反映光能利用能力和效率的重要指标^[17-18],光合作用对干旱胁迫十分敏感,是作物抗旱生理研究的重点指标之一。由表 3 可知,与 CK 相比,D 处理玉米叶片光合参数 P_n 、 T_r 和 G_s 大多显著降低,‘先玉 335’的降幅分别为 26.4%、17.0% 和 16.2%,‘中单 2 号’分别为 16.9%、23.6% 和 23.1%,而它们的 C_i 均变化不显著;与 D 处理相比,BS+D 处理下‘先玉 335’幼苗的 P_n 和 T_r 分别显著增加 47.4% 和 35.3%, G_s 显著减小 30.9%, C_i

也有所降低,‘中单 2 号’的 P_n 显著增加 42.9%, C_i 显著减小 10.2%,而 T_r 和 G_s 变化却不大。同时,与 CK 相比,D 处理下‘先玉 335’幼苗叶片的水分利用效率(WUE)显著下降 10.3%,‘中单 2 号’的 WUE 则增加 18.7%;与 D 相比,BS+D 处理下‘先玉 335’和‘中单 2 号’的 WUE 分别显著增加 9.0% 和 36.3%。

以上结果说明根部浇灌沼液能够明显缓解干旱胁迫对玉米幼苗光合作用的抑制,有效提高干旱胁迫下玉米幼苗光合作用效率和水分利用效率,且对抗旱性较强的‘中单 2 号’影响较大。

表 3 沼液对干旱胁迫下玉米幼苗光合特性的影响

Table 3 Effect of biogas slurry on the photosynthetic property of maize seedlings under drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	净光合速率 P_n / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 T_r / [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 G_s / [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 C_i /($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	水分利用效率 WUE/ ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)
先玉 335 Xianyu 335	CK	1.56±0.56b	0.41±0.02a	37.82±11.1a	373.3±23.2a	3.80±0.53a
	D	1.16±0.01c	0.34±0.02b	35.00±3.2a	359.0±34.0ab	3.41±0.22b
	BS+D	1.71±0.01a	0.46±0.04a	24.20±14.0b	337.1±56.0b	3.72±0.00a
中单 2 号 Zhongdan 2	CK	1.24±0.09b	0.55±0.06a	58.10±28.7a	365.3±40.7ab	2.25±0.14b
	D	1.12±0.21bc	0.42±0.01b	40.70±19.0b	387.5±18.0a	2.67±0.20b
	BS+D	1.60±0.40a	0.44±0.04b	40.80±21.1b	348.1±65.4b	3.64±2.51a

3 讨论

植物幼苗阶段是受水分亏缺影响相对严重的时期,与其他作物相比,玉米苗期生长相对缓慢,如果水分亏缺将会严重影响玉米的整个生长发育^[11]。因此,改进玉米的节水措施,缓解玉米幼苗期的干旱胁迫伤害,是玉米优质增产的重要途径。本试验发现,中等抗旱品种‘先玉 335’和较强抗旱品种‘中单 2 号’在干旱胁迫下幼苗的生长明显受到抑制,50% 沼液根施处理可以使干旱胁迫下两品种玉米幼苗的苗高、茎粗、叶面积、叶绿素 SPAD 值、叶片氮元素含量和叶片干鲜比均显著增加,根冠比下降,根长增加,须根数增多,根系活力增强。说明沼液施用可能通过促进干旱胁迫下玉米幼苗的生长以增强其对干旱胁迫的耐受性,且抗旱性较强的‘中单 2 号’对干旱胁迫的耐受程度优于‘先玉 335’,这与赵成凤等对干旱胁迫下玉米幼苗生长的缓解效应研究结果^[19]一致。

植物为了减缓逆境胁迫造成的生理代谢失衡,通常会在细胞内积累可溶性蛋白、可溶性糖与脯氨酸等渗透调节物质,提高细胞内溶质浓度,以降低细胞水势,从而能有效缓解逆境胁迫对植物造成的伤

害^[9,11]。本研究结果表明,干旱胁迫下沼液施用能够增加两品种玉米幼苗叶片中可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量,但‘先玉 335’的可溶性蛋白和可溶性糖含量变化不大,表明沼液能够诱导干旱胁迫后玉米叶片可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质的积累,减轻干旱胁迫对玉米幼苗生长的危害,提高幼苗对干旱胁迫的适应性。这与李世玉等在甜瓜上的研究结果^[20]相似,而杨奥军等^[21]发现外源喷施 5-ALA 能够使干旱胁迫下玉米幼苗渗透物质含量降低,这与本研究结果相反,分析可能由于他们在试验中选用较高浓度 20% PEG-6000 模拟重度干旱胁迫处理以及缓解干旱胁迫所采用的活性物质不同,因而使得同样的物种对干旱胁迫的响应存在差异。

MDA 是反映植物逆境条件下膜脂过氧化程度的生理指标,其含量的高低反映质膜的过氧化损伤程度^[9,13-14]。植物体内存在的酶促保护体系可清除逆境胁迫下产生的大量活性氧(ROS)^[17-18,22-28],其中包括 SOD、POD、CAT 等。干旱胁迫下,植物体内活性氧的大量产生会诱导 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶系活性升高,SOD 能够快速催化歧化反应,将 O_2^- 歧化成 H_2O_2 和 O_2 ^[23,25],然后由 POD、

CAT以协同作用的方式有效地清除 H_2O_2 ,最终保护植物免受活性氧损伤^[25,29]。本试验中玉米幼苗施用沼液结果还显示,干旱胁迫下玉米幼苗叶片中SOD、POD及CAT活性显著高于对照,叶片MDA含量也显著提高,说明植株在干旱胁迫后能通过提高SOD、POD及CAT等抗氧化酶系活性,清除体内多余的ROS,保护植物组织免受氧化伤害,一定程度上提高植物对干旱胁迫的耐受性,但仍受到了过氧化伤害。沼液施用能够使得干旱胁迫下玉米幼苗叶片中3种酶活性得到进一步提高(‘中单2号’的CAT活性除外),说明沼液能通过增强抗氧化酶的活性,可以减缓活性氧的积累,从而提高玉米幼苗抗氧化、抗衰老的能力,缓解干旱胁迫对玉米幼苗的毒害作用。另外,赵成凤等^[19]发现外源喷施褪黑素能够显著增强干旱胁迫玉米植株叶片SOD和CAT活性,以及降低其MDA含量,这都与本试验结果相似;前人在甜瓜^[20]、紫花苜蓿幼苗^[18]、苹果矮化砧木幼苗^[24]以及黄瓜幼苗^[26]上的研究结果也与本试验结果基本相似,但也有不同之处。这可能与胁迫条件、物种以及缓解逆境胁迫所采用的生物活性物质不同有关,许多研究者利用外源施加褪黑素、SNP、 H_2S 、SA、 H_2O_2 、亚精胺、腐植酸和5-ALA等植物生长调节剂或生物活性物质可缓解不同逆境胁迫,如低温或高温、干旱、盐碱等对植物造成的伤害,都取得了较好的效果^[15-18,20,23-24,26-27],而本试验首次利用沼液缓解干旱胁迫对玉米幼苗造成的伤害,也取得了较理想的效果,这可能与沼液中富含许多生物活性物质,如黄腐酸、丁酸、吡啶乙酸、赤霉素、脱落酸及各种水解酶类等^[3-10]有关,因而,在干旱胁迫下施用沼液可能由于其成分中的一种或几种活性物质发挥类似植物生长调节剂或其他生物活性物质的作用,从而达到缓解逆境胁迫对植物的毒害作用。

叶绿素是参与植物光合作用过程的主要分子之一,在叶片中起到光能吸收、传递和转换作用,叶绿素含量高低反映了植物叶片光合作用水平的高低^[3,10-12,17-19],其在处于逆境时会发生不稳定降解^[10-11]。在本试验中,2种玉米叶片叶绿素SPAD值在干旱胁迫下降低,而在施用沼液后明显增加,且较高叶绿素含量能够促进苗期叶片光合产物的合成,利于最终较高产量的形成,这与王鹏等^[25]的研究结果相似,也与杜蕾等^[24]在苹果矮化砧木幼苗和杨涛等^[29]在玉米幼苗上的研究结果相似。植物光合作用的强度主要通过光合参数来反映,叶片气孔导度的调节可防止叶和茎水势过度下降所引发的水

分传导失效,但同时会阻碍水气交换降低 P_n 及 T_r ^[26];而且有人发现 G_s 与 P_n 、 T_r 均呈直线相关,且 G_s 与 T_r 的相关系数大于与 P_n 的相关系数^[29],说明水分胁迫对蒸腾作用的影响要大于光合作用。本试验结果显示,干旱胁迫下2种玉米幼苗叶片光合参数 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均降低(‘中单2号’的 C_i 除外),光合作用效率下降;沼液施用能够使干旱胁迫下两品种玉米幼苗叶片的 P_n 、 T_r 增加以及 C_i 、 G_s 下降,而‘中单2号’的 T_r 、 G_s 变化不大,表明沼液施用能够使干旱胁迫下玉米幼苗叶片光合参数 P_n 、 T_r 、 C_i 的下降趋势得到缓解,从而提高光合能力,且对‘中单2号’的缓解效果更明显,这与‘中单2号’抗旱性较强,属于高水分利用效率、中等耗水型品种有关^[29]。导致光合作用效率下降的原因有气孔因素和非气孔因素。在本试验的干旱胁迫条件下,‘中单2号’叶片的 G_s 下降,说明气孔因素是其光合作用效率下降的主要原因,而‘先玉335’叶片的 C_i 下降, G_s 变化不显著,说明其光合速率下降的主要原因则是非气孔因素,根部浇灌沼液可以缓解干旱胁迫对玉米叶片光合作用效率的抑制。这与外源喷施5-ALA使干旱胁迫下玉米幼苗的 G_s 和 C_i 增加的结果^[25]不一致,可能与干旱胁迫下外源添加的活性物质种类不同有关。

有学者认为,提高WUE的节水作用不亚于工程节水措施,是经济有效的方法,节水对提高农作物水分利用效率具有重要意义,可以减少无效的水分消耗,能够增加农作物产量,提高水分利用效率^[12]。本试验发现干旱胁迫使‘先玉335’幼苗叶片中WUE降低,‘中单2号’的WUE升高,沼液施用使干旱胁迫下‘先玉335’和‘中单2号’的幼苗叶片WUE均升高,而且相同胁迫条件下‘中单2号’的水分利用效率高于‘先玉335’的,本试验也进一步证实了两品种玉米的抗旱性存在一定差异。

4 结 论

干旱胁迫下玉米幼苗和根系生长明显受到抑制,苗高、茎粗、叶面积和叶片干鲜重比降低,叶片叶绿素SPAD值以及光合参数 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 和WUE明显下降(‘中单2号’的 C_i 除外),幼苗叶片MDA含量、渗透调节物质含量(可溶性蛋白除外)和抗氧化酶活性显著提高。根施50%沼液处理使干旱胁迫下玉米幼苗的苗高、茎粗、叶面积和叶片干鲜重比等形态指标,根系活力,叶片氮元素含量和叶绿素含量均显著增加,根冠比明显下降,以及光合参

数 P_n 、 T_r 、WUE 增大, G_s 和 C_i 下降, 叶片可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸等含量和 SOD、POD、CAT 等 3 种抗氧化酶活性得到进一步提高(‘中单 2 号’的 CAT 除外), 叶片 MDA 含量下降, 显著降低细胞膜透性, 增强了玉米对干旱胁迫的耐受能力。沼液对干旱胁迫下‘先玉 335’幼苗的生长指标影响更明显, 而对‘中单 2 号’幼苗叶片的渗透调节物质含量、

抗氧化酶活性、膜脂过氧化程度和光合参数等影响更明显, 说明 2 种抗旱性不同的玉米品种对干旱胁迫的耐受性也存在差异。因此, 在干旱胁迫条件下施用沼液既能充分利用沼肥资源, 提高沼液的综合利用效率, 还能促进玉米产量的增加, 更为重要的是可以节水抗旱, 对农业生产实践具有指导意义, 可在玉米生产上推广应用。

参考文献:

- [1] 余林辉, 蔡晓腾, 徐萍, 等. 植物抗旱节水: 从实验室到田间[J]. 中国科学: 生命科学, 2017, **47**(1): 145-154.
YU L H, CAI X T, XU P, *et al.* Drought-resistant and water-saving plants: From laboratory to field[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2017, **47**(1): 145-154.
- [2] 文小琴, 舒英格. 农业节水抗旱技术研究进展[J]. 天津农业科学, 2017, **23**(1): 28-32.
WEN X Q, SHU Y G. Research progress of agricultural water saving and drought resistance technology[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2017, **23**(1): 28-32.
- [3] 万海文, 贾亮亮, 赵京奇, 等. 追施沼液对小麦光合特性及土壤酶活性和养分含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, **45**(1): 35-44.
WAN H W, JIA L L, ZHAO J Q, *et al.* Effects of topdressing biogas slurry on photosynthesis characteristics of wheat and soil enzyme activities and nutrients[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, **45**(1): 35-44.
- [4] 何自涵, 周艳丽, 崔彦如, 等. 沼液施肥对黄瓜幼苗质量和土壤化学性状的影响[J]. 东北农业科学, 2022, **47**(2): 124-128.
HE Z H, ZHOU Y L, CUI Y R, *et al.* Effects of biogas slurry fertilization on seedling quality and soil chemical properties of cucumber[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, **47**(2): 124-128.
- [5] 姚光伟, 付怡, 汪文静. 沼液对玉米‘德单 123’产量及土壤肥力的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, **63**(11): 2 552-2 554.
YAO G W, FU Y, WANG W J. Effect of slurry on yield of Dedan 123 and soil fertility[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, **63**(11): 2 552-2 554.
- [6] 杨闯, 徐文修, 李钦钦, 等. 沼液浸种对陆地棉生长及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2009, **46**(1): 138-141.
YANG C, XU W X, LI Q Q, *et al.* Effect of biogas slurry soaking seed on growth and yield of upland cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, **46**(1): 138-141.
- [7] 蔺格. 接种丛枝菌根真菌施用沼肥对甘草抗旱性和矿质营养的影响[D]. 贵阳: 贵阳中医学院, 2014.
- [8] 吴佳. 沼液对美国香豌豆生长发育、抗旱性及土壤肥力的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [9] 郑三妹. 施用沼肥对南丰蜜桔抗旱性影响的试验小结[J]. 现代园艺, 2007(11): 9.
ZHENG S M. Experimental summary of the effect of biogas fertilizer application on drought resistance of Nanfeng tangerine[J]. *Xiandai Horticulture*, 2007(11): 9.
- [10] 吕品, 王立民, 张继舟, 等. 沼液抗旱剂重金属安全性分析及对大豆叶片 T_r 和 RWC 的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(34): 12 219-12 221.
LÜ P, WANG L M, ZHANG J Z, *et al.* Biogas slurry ‘drought resistance agents’ safety analysis of heavy metals and the effects on T_r and RWC of soybean leaf[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* 2014, **42**(34): 12 219-12 221.
- [11] 孙小妹, 陈思瑾, 李翔华, 等. 叶面喷施沼液对玉米叶片光合特性及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, **54**(5): 60-67.
SUN X M, CHEN S J, LI Y H, *et al.* Effects of biogas slurry spraying on leaf photosynthetic characteristics of maize[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, **54**(5): 60-67.
- [12] 张兴华, 高杰, 杜伟莉, 等. 干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, **41**(1): 154-159.
ZHANG X H, GAO J, DU W L, *et al.* Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of maize hybrids at seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, **41**(1): 154-159.
- [13] 任军, 才卓. ‘先玉 335’玉米品种特点及推广建议[J]. 现代农业科技, 2015(15): 68-70.
REN J, CAI Z. Variety characteristic and promotion suggestions of Xianyu 335 maize[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(15): 68-70.
- [14] 赵霞, 刘诗慧, 张国方, 等. 16 个玉米杂交种的抗旱性评价[J]. 河南农业科学, 2017, **46**(12): 24-28.
ZHAO X, LIU S H, ZHANG G F, *et al.* Evaluation on drought tolerance of 16 maize hybrids[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, **46**(12): 24-28.
- [15] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 赵丽娟, 麻冬梅, 王文静, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花

- 苜蓿幼苗抗氧化能力以及光合作用效率的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(8): 1 355-1 363.
- ZHAO L J, MA D M, WANG W J, *et al.* Effect of exogenous melatonin on antioxidant capacity and photosynthetic efficiency of alfalfa seedling under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(8): 1 355-1 363.
- [18] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 等. 干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶片非结构性碳水化合物代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(12): 2 101-2 107.
- LI Y H, LIU J H, ZHAO B P, *et al.* Effects of humic acid on metabolism of non-structural carbohydrates in oat leaves under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(12): 2 101-2 107.
- [19] 赵成凤, 杨 梅, 李红杰, 等. 叶面喷施褪黑素对干旱及复水下玉米光合特性和抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(9): 1 526-1 534.
- ZHAO C F, YANG M, LI H J, *et al.* Effect of foliar spraying melatonin on photosynthesis and antioxidant system of maize leaves under drought stress and rewatering[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(9): 1 526-1 534.
- [20] 李世玉, 程登虎, 闫 星, 等. 外源 SNP 对盐胁迫下甜瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(6): 994-1 002.
- LI S Y, CHENG D H, YAN X, *et al.* Effect of exogenous SNP on the growth and antioxidant enzyme activities in melon seedlings under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(6): 994-1 002.
- [21] 杨奥军, 常巧玲, 王 鹏, 等. 外源 5-ALA 对干旱胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 作物杂志, 2022(3): 194-199.
- YANG A J, CHANG Q L, WANG P, *et al.* Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid on seed germination and seedling growth of maize under drought stress[J]. *Crops*, 2022(3): 194-199.
- [22] 孟清波, 张谨薇, 马万成, 等. 叶面喷施沼液肥对高温胁迫下辣椒幼苗生长及生理特性的影响[J]. 中国瓜菜 2020, **33**(8): 32-36.
- MENG Q B, ZHANG J W, MA W C, *et al.* Effects of leaf spraying biogas slurry fertilizer on the growth and physiological characteristics of pepper seedlings under high temperature stress[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, **33**(8): 32-36.
- [23] 李丽杰, 顾万荣, 孟 瑶, 等. 干旱胁迫下亚精胺对玉米幼苗抗旱性影响的生理生化机制[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(2): 554-564.
- LI L J, GU W R, MENG Y, *et al.* Physiological and biochemical mechanism of spermidine improving drought resistance in maize seedlings under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(2): 554-564.
- [24] 杜 蕾, 杨建宁, 王星星, 等. 外源 H₂O₂ 对盐碱胁迫下苹果矮化砧木幼苗生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(10): 1 700-1 710.
- DU L, YANG J N, WANG X X, *et al.* Effect of exogenous H₂O₂ treatment on physiological characteristics of salt-alkali stressed seedlings of apple dwarf rootstock[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(10): 1 700-1 710.
- [25] 王 鹏, 杨奥军, 冯志进, 等. 外源 5-ALA 对干旱胁迫下玉米幼苗生长的缓解效应及抗氧化酶基因表达的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, **40**(4): 1-9.
- WANG P, YANG A J, FENG Z J, *et al.* Effects of exogenous 5-ALA on growth of maize seedlings and expression of antioxidant enzyme genes under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, **40**(4): 1-9.
- [26] 银珊珊, 周国彦, 顾博文, 等. 褪黑素引发对干旱胁迫下黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2022, **38**(19): 30-36.
- YIN S S, ZHOU G Y, GU B W, *et al.* Effects of melatonin priming on physiological characteristics of cucumber seedlings under drought stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, **38**(19): 30-36.
- [27] CHARTZOULAKIS K, *et al.* Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relations and growth of two avocado cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2002, **95**(1/2): 39-50.
- [28] CAO H H, ZHANG M, ZHAO H, *et al.* Deciphering the mechanism of β -aminobutyric acid-induced resistance in wheat to the grain aphid, *Sitobion avenae*[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(3): e91768.
- [29] 杨 涛, 梁宗锁, 薛吉全, 等. 不同玉米品种水分利用效率的差异性研究[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(10): 21-25.
- YANG T, LIANG Z S, XUE J Q, *et al.* Diversity of water use efficiency of various maize varieties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, **21**(10): 21-25.

(编辑:裴阿卫)