

李锦秀, 郭勇智, 崔蓉, 等. 干旱胁迫对玉米雄穗发育特征及产量的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(3): 26-33.
LI Jinxiu, GUO Yongzhi, CUI Rong, et al. Influence of drought stress on tassel development characteristics and yield of maize[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(3): 26-33.

干旱胁迫对玉米雄穗发育特征及产量的影响

李锦秀, 郭勇智, 崔蓉, 张欣宇, 王呈玉, 刘淑霞

(吉林农业大学 资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用

重点实验室, 吉林 长春 130118)

摘要:【目的】探究干旱胁迫对玉米雄穗发育特征及产量的影响, 以期为中国东北地区玉米种植抗旱保产提供一定理论基础。【方法】采用盆栽试验, 设置原土处理和添加土壤改良剂处理, 并于玉米大喇叭口期至吐丝期进行不同程度的干旱胁迫: 正常供水、轻度干旱胁迫、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫, 研究不同程度干旱胁迫对玉米的抽雄吐丝间隔、雄穗形态特征、生理指标以及产量的影响。【结果】干旱胁迫导致玉米雌穗吐丝时间延后, 雌、雄穗开花吐丝不同步, 且在重度干旱胁迫时达到最大值, 其中原土处理较 CK 延长了 6.33 d, 添加土壤改良剂处理延长了 4.67 d; 不同程度干旱胁迫会导致玉米雄穗变小、主轴缩短, 轻度干旱胁迫有利于雄穗积累干物质, 原土处理和添加土壤改良剂处理的雄穗干物质分别比 CK 增加了 5.18% 和 14.87%; 干旱胁迫会促使雄穗分泌抗氧化系统酶以及渗透调节物质抵御逆境伤害, 但重度干旱胁迫时雄穗内部产生过多丙二醛 (MDA) 以及有害物质, 会导致抗氧化系统酶活性有所降低; 干旱胁迫会造成玉米产量严重下降, 重度干旱胁迫时原土处理的产量与 CK 相比下降了 62.39%, 添加土壤改良剂处理的产量则下降了 57.77%。【结论】干旱胁迫会对玉米雄穗发育以及产量造成严重影响, 尤其在重度干旱胁迫时, 影响程度最为严重, 会对雄穗造成不可逆伤害; 施用土壤改良剂可以在一定程度上提高玉米雄穗抗逆性, 从而保证玉米雄穗正常生长发育以及产量。

关键词: 干旱胁迫; 玉米; 雄穗; 形态特征; 生理特性; 产量

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2022)03-0026-08

Influence of drought stress on tassel development characteristics and yield of maize

LI Jinxiu, GUO Yongzhi, CUI Rong, ZHANG Xinyu, WANG Chengyu, LIU Shuxia

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in Commodity Grain Base of Jilin Province, Changchun 130118, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of drought stress on maize tassel development characteristics and yield, and provide a theoretical basis for drought resistance and yield protection of maize planting in northeast China. 【Method】In the pot experiment, original soil treatment and adding soil conditioner treatment were set up. Different drought stress degrees of normal water supply (CK), light drought stress, moderate drought stress, and severe drought stress were conducted from the big trumpet stage to silking stage of maize, to study the

收稿日期: 2021-07-16 网络首发时间: 2022-03-31 10:28:48

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220330.1357.002.html>

作者简介: 李锦秀, 硕士研究生, 主要从事施肥与环境相关研究, E-mail: lijinxu96@163.com; 通信作者: 刘淑霞, 教授, 博士, 主要从事施肥与环境相关研究, E-mail: liushuxia2005824@163.com

基金项目: 吉林省重点研发计划 (20200403069SF)

effects of different drought stress degrees on maize anthesis-silking interval, tassel morphological and physiological characteristics and yield. 【Result】 Drought stress delayed the silking time of the female inflorescence of maize causing the tasseling and, silking of the maize to be asynchronous, most seriously under severe drought stress. Compared with CK, the anthesis-silking interval in the original soil and adding soil conditioner treatments was extended by 6.33 and 4.67 d, respectively. Different drought stress degrees decreased the maize size and spindle length. Light drought stress was conducive to the accumulation of dry matter in the maize tassels, and compared with CK, the tassel dry matter in the original soil treatment and the adding soil conditioner treatment increased by 5.18% and 14.87%, respectively. Drought stress prompted the tassels to secrete antioxidant system enzymes and osmotic adjustment substances to resist adversity damage. However, under severe drought stress, too much malondialdehyde (MDA) and harmful substances were produced in the tassel, which caused the activity of the antioxidant system enzyme to decrease. Drought stress caused a serious decline in maize yield. Under severe drought stress, the maize yield in the original soil treatment decreased by 62.39% compared with CK, and the yield in the adding soil conditioner treatment decreased by 57.77%. 【Conclusion】 Drought stress seriously affects the development and yield of maize tassels, especially under severe drought stress, which causes irreversible damage to the tassels. The application of soil conditioner can improve the stress resistance of maize tassels to a certain extent, thereby ensuring the normal growth and development of maize tassels and yield.

Key words: Drought stress; Maize; Tassel; Morphological characteristic; Physiological characteristic; Yield

在全球气候变暖以及人类活动的共同影响下, 干旱已成为限制玉米生长以及产量的重要因素之一^[1-2]。东北地区是我国玉米主要产区, 但近些年来东北地区干旱愈发严重, 对玉米产量造成了极大的威胁^[3]。在我国玉米的整个生长周期中, 抽雄期至吐丝期是玉米的需水临界期, 对于干旱胁迫反应最为敏感, 此期间的水分亏缺会在很大程度上影响玉米的产量。雄穗作为玉米的主要生殖器官, 其发育程度与产量有着密切联系^[4-5]。

在干旱条件下, 玉米雄穗将从外部形态结构以及内部生理状态等一系列方面发生变化从而适应干旱逆境^[6]; 宋凤斌等^[7]认为干旱胁迫会导致玉米雄穗抽出缓慢甚至不能抽出, 雄穗分枝数以及大小也均会受到影响。关于干旱胁迫对玉米生理特性方面的影响, 前人做了大量研究, 发现干旱胁迫会造成植株体内产生大量活性氧分子, 破坏抗氧化系统与活性氧之间的平衡, 同时会导致细胞膜蛋白质以及酶结构的损伤^[8]。为了避免过度干旱而导致细胞内部环境紊乱, 植株体内会产生一系列防御机制。杨娟等^[9]模拟干旱胁迫对玉米叶片的研究发现抗氧化系统酶在消除细胞内过多氧自由基方面发挥了积极作用; Liu 等^[10]、Zaher-Ara等^[11]和杨晓龙^[12]研究发现, 干旱胁迫下渗透调节物质的存在能够有效地维持植株细胞内外渗透压平衡, 提高作物抗逆

性, 对抵御逆境胁迫同样起着关键作用。在干旱胁迫下, 玉米雄穗抽出与雌穗吐丝的时间间隔将会增大, 此间隔被称为抽雄吐丝间隔^[13], 郭江等^[14]认为抽雄吐丝间隔与产量具有密切联系。因此, 探究干旱胁迫对玉米雄穗发育特征和产量的影响以及应对措施具有重要意义。

关于干旱胁迫对玉米生长及生理特性的影响, 前人已做了许多研究, 但大多数只探讨了干旱胁迫对玉米植株生长形态以及对穗位叶生理特性的影响^[15-16], 对玉米雄穗形态特征和生理特性影响的研究还相对较少。因此, 本试验共设置 2 种土壤处理以及 4 种水分梯度, 通过测定不同处理的玉米抽雄吐丝间隔、雄穗形态结构、雄穗生理指标以及产量, 来探究并明确干旱胁迫对玉米雄穗发育特征及产量的影响, 确定施用土壤改良剂的效果, 从而为中国东北地区玉米种植抗旱保产提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地位于吉林农业大学资源与环境学院田间试验培养场 (43°47'42"N, 123°20'45"E), 供试土壤为盐碱土, 0~20 cm 土壤理化性质如下: pH (水、土质量比 1:2.5) 8.3, 有机质 16.14 g/kg, 碱解氮

31.44 mg/kg, 速效磷 7.23 mg/kg, 速效钾 88.76 mg/kg。

供试作物为玉米, 品种为‘富民 985’。试验共设置 2 种土壤处理, 分别是供试土壤施用无机肥料(原土处理)以及供试土壤施用无机肥料后添加土壤改良剂(添加土壤改良剂处理), 并于玉米大喇叭口期至吐丝期进行不同程度的干旱胁迫处理, 干旱胁迫共持续 20 d 左右, 土壤含水量梯度水平分别是正常供水(CK, 保证土壤含水量大于田间持水量的 80%)、轻度干旱胁迫(LD, 保证土壤含水量维持在田间持水量的 70%~80%)、中度干旱胁迫(MD, 保证土壤含水量维持在田间持水

量的 60%~70%) 以及重度干旱胁迫(SD, 保证土壤含水量维持在田间持水量的 50%~60%)。胁迫期间采用便携式土壤水分测定仪定期检测土壤含水量, 根据含水量进行补水, 保证胁迫期间土壤含水量在所设范围内。2 种土壤处理土壤水分基础数据如表 1 所示。

为消除单个试验数据搜集可能产生的误差, 盆栽盆的位置随机排列, 并定期调换位置。每个处理设置 3 次重复, 每次重复设置 3 盆。盆高 35 cm, 每盆装土 16 kg, 肥料用量根据田间施用量计算为每盆施入尿素 5.9 g, 磷酸二铵 3.4 g, 硫酸钾 4.0 g。

表 1 2 种土壤处理土壤水分基础数据
Table 1 Basic data of soil moisture in two soil treatments

土壤处理 Soil treatment	含水量/% Water content	田间持水量/% Field water capacity	饱和含水量/% Saturated water content	容重/(g·cm ⁻³) Bulk density	萎蔫系数/% Wilting coefficient
原土 Original soil	3.55±0.04	17.53±0.22	35.33±0.95	1.47±0.04	8.83±0.08
添加土壤改良剂 Adding soil conditioner	7.72±0.12	23.19±0.28	40.81±0.24	1.48±0.12	7.22±0.11

1.2 测定方法

1.2.1 玉米抽雄吐丝间隔测定 观察记录各玉米植株雄穗开花期以及雌穗吐丝期, 计算抽雄吐丝间隔^[13]。

1.2.2 玉米雄穗形态指标测定 雄穗大小=雄穗主轴长+平均分支长×分枝数, 雄穗主轴长采用卷尺进行测量; 主轴粗采用游标卡尺进行测量; 干物质量采用烘干法测定。

1.2.3 玉米雄穗生理指标测定 抗氧化系统酶活性均采用 ELISA 检测试剂盒进行检测: 取一定量的玉米雄穗加入 PBS 缓冲溶液充分研磨, 4 000 r/min 离心 15 min 后取上清液, 根据 ELISA 检测试剂盒的操作说明步骤进行提取, 利用酶标仪测定玉米雄穗中的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)的活性。脯氨酸(Pro)含量采用茚基水杨酸法测定, 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定, 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定, 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[17]。

1.2.4 玉米产量指标测定 玉米成熟收获后测定单株产量构成因子——穗长、秃尖长、穗粗、行数以及行粒数。

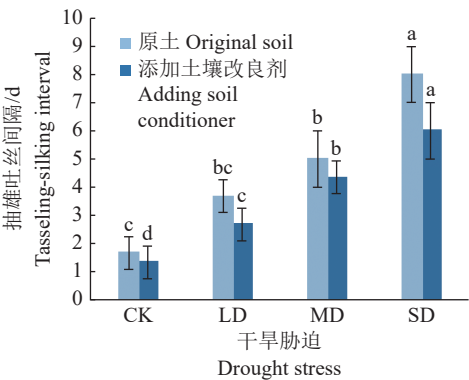
1.3 数据分析

数据均采用 Microsoft Excel 2016 软件整理, 采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差统计分析, 采用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对玉米抽雄吐丝间隔的影响

如图 1 所示, 干旱胁迫对玉米抽雄吐丝间隔有显著影响。在正常供水条件下, 2 种土壤处理的玉米雌、雄穗开花吐丝同步性较强, 抽雄吐丝间隔较小; 但随着干旱程度加剧, 玉米抽雄吐丝间隔也随之延长, 并在重度干旱胁迫时达到峰值。从抽雄吐



CK: 正常供水, LD: 轻度干旱胁迫, MD: 中度干旱胁迫, SD: 重度干旱胁迫; 相同土壤处理不同干旱胁迫程度柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

CK: Normal water supply, LD: Light drought stress, MD: Moderate drought stress, SD: Severe drought stress; Different lowercase letters on the columns of different drought stress degrees in the same soil treatment indicate significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

图 1 干旱胁迫对玉米抽雄吐丝间隔的影响
Fig. 1 Effects of drought stress on maize tasseling-silking interval

丝间隔分析, 重度干旱胁迫时, 添加土壤改良剂处理的抽雄吐丝间隔同 CK 相比延长了 4.67 d, 而原土处理中则延长了 6.33 d; 因此, 在干旱胁迫条件下施用土壤改良剂可以在一定程度上缓解玉米抽雄吐丝间隔的延长。

2.2 干旱胁迫对玉米雄穗形态特征的影响

由表 2 可知, 随着干旱胁迫程度增加, 2 种土壤

处理的雄穗大小、主轴长以及主轴粗均不同程度地降低。在 CK 中, 原土处理与添加土壤改良剂处理中的雄穗形态特征并无明显差异; 但在重度干旱胁迫时, 原土处理的雄穗大小、主轴长、主轴粗相对于 CK 分别缩小了 50.76%、11.64%、52.52%, 而添加土壤改良剂处理分别缩小了 49.08%、11.32%、37.94%。

表 2 干旱胁迫对玉米雄穗形态特征的影响¹⁾
Table 2 Effects of drought stress on morphological characteristics of maize tassels

土壤处理 Soil treatment	干旱胁迫 Drought stress	大小/cm Size	主轴长/cm Spindle length	主轴粗/mm Spindle thickness	干质量/g Dry weight
原土 Original soil	CK	202.47±9.41a	43.80±1.50a	7.73±0.11a	4.76±0.079a
	LD	167.60±18.49ab	42.77±4.20ab	6.67±0.10ab	5.02±0.43a
	MD	127.83±32.04bc	40.83±0.76ab	5.33±0.12bc	4.02±0.96ab
	SD	99.70±22.25c	38.70±0.75b	3.67±0.06c	2.98±0.71b
添加土壤改良剂 Adding soil conditioner	CK	213.40±11.84a	44.17±2.84a	8.33±0.08a	4.75±0.88ab
	LD	178.73±7.92b	43.17±1.26ab	7.33±0.06ab	5.58±0.80a
	MD	150.20±20.19c	41.87±3.46ab	6.10±0.07bc	4.20±0.92ab
	SD	108.67±3.18d	39.17±1.26b	5.17±0.08c	3.44±0.69b

1) CK: 正常供水, LD: 轻度干旱胁迫, MD: 中度干旱胁迫, SD: 重度干旱胁迫; 相同土壤处理同列数据后的不同小写字母表示不同干旱胁迫程度间差异显著($P<0.05$, Duncan's法)

1) CK: Normal water supply, LD: Light drought stress, MD: Moderate drought stress, SD: Severe drought stress; Different lowercase letters in the same column of the same soil treatment indicate significant differences among different drought stress degrees ($P<0.05$, Duncan's method)

随着干旱胁迫程度增加, 不同土壤处理的玉米雄穗干物质质量均呈现先增加后降低的趋势。轻度干旱胁迫可促进玉米雄穗积累干物质, 原土处理的雄穗干物质较 CK 相比增加了 5.18%, 添加土壤改良剂处理的雄穗干物质则增加了 14.87%; 同 CK 及轻度干旱胁迫处理相比, 中度及重度干旱胁迫的雄穗干物质质量均有所下降, 其中添加土壤改良剂处理的雄穗干物质积累量要稍优于原土处理的。

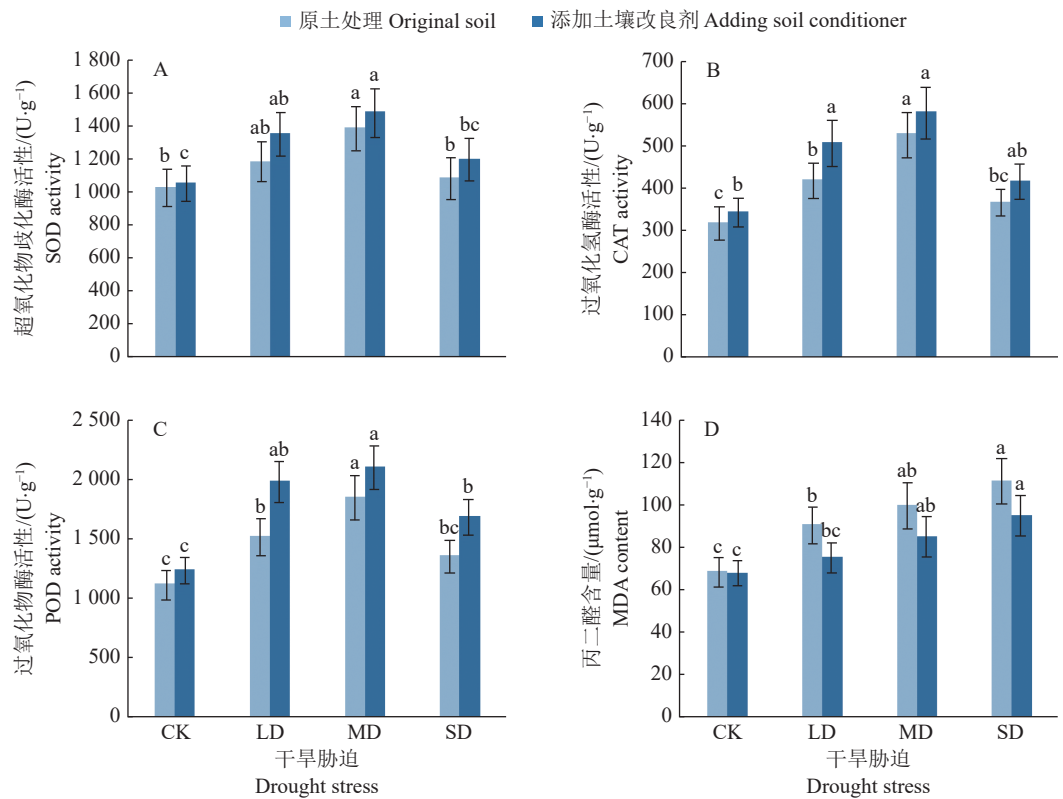
2.3 干旱胁迫对玉米雄穗生理特性的影响

2.3.1 干旱胁迫对玉米雄穗抗氧化系统酶活性及 MDA 含量的影响 如图 2A 所示, 在正常供水条件下, 2 种土壤处理的雄穗 SOD 活性均大于 $1000\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$; 雄穗的 SOD 活性在中度干旱胁迫时达到峰值, 随干旱胁迫程度变化显著, 原土处理和添加土壤改良剂处理的雄穗 SOD 活性同 CK 相比分别增加了 35.32% 和 41.57%; 在重度干旱胁迫时, 2 种土壤处理的雄穗 SOD 活性均下降至与 CK 处理中酶活性相当的水平, 但土壤改良剂处理中的 SOD 活性依旧较高, 酶活性达 $1\,199.83\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$, 同 CK 相比升高了 14.26%。

如图 2B、2C 所示, 玉米雄穗的 CAT 和 POD

活性受干旱影响显著, 二者均在中度干旱胁迫时达到峰值, 在重度干旱胁迫时活性下降。在中度干旱胁迫时, 原土处理和添加土壤改良剂处理的 CAT 活性分别比 CK 升高了 66.61% 以及 69.39%; 在重度干旱胁迫时, 原土处理的雄穗 CAT 活性下降幅度较大, 降至与 CK 的酶活性相当的水平, 虽然添加土壤改良剂处理的雄穗酶活性也有所降低, 但依旧处于较高水平, 同 CK 相比增加了 21.22%。雄穗 POD 活性的变化趋势同 CAT 变化趋势基本一致。在正常供水条件下, 2 种土壤处理雄穗的 POD 活性差异不明显; 在轻度干旱胁迫时, 原土处理雄穗 POD 的分泌水平较低, 同 CK 相比升高了 36.67%, 而添加土壤改良剂处理 POD 的分泌水平则较高, 同 CK 相比升高了 60.71%; 在中度干旱胁迫时, 原土处理中的 POD 活性达到峰值, 酶活性达到 $1\,845.17\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$, 虽然土壤改良剂处理酶活性依旧较高, 但其分泌水平有所减缓; 在重度干旱条件下, 2 种处理雄穗的酶活性均有所下降。

如图 2D 所示, 雄穗的 MDA 含量是随着干旱胁迫程度增加而大幅度升高, 并在重度干旱胁迫时达到峰值。在正常供水条件下, 2 种土壤处理雄穗



CK: 正常供水, LD: 轻度干旱胁迫, MD: 中度干旱胁迫, SD: 重度干旱胁迫; 各小图中相同土壤处理不同干旱胁迫程度柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

CK: Normal water supply, LD: Light drought stress, MD: Moderate drought stress, SD: Severe drought stress; Different lowercase letters on the columns of different drought stress degrees in the same soil treatment in each figure indicate significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

图 2 干旱胁迫对玉米雄穗抗氧化系统酶活性及丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on antioxidant system enzyme activities and MDA content in maize tassels

的 MDA 含量无较大差异。随着干旱胁迫程度的增加, 原土处理的雄穗对干旱胁迫反应较为敏感, 在重度干旱胁迫时, 雄穗 MDA 含量达 $111.27\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 同 CK 相比增加了 62.92%; 添加土壤改良剂处理的雄穗对轻度、中度干旱胁迫反应不敏感, 对重度干旱胁迫反应较为敏感, 在轻度以及中度干旱胁迫时, 其雄穗 MDA 含量同 CK 相比分别提高了 10.86% 以及 25.82%, 在重度干旱胁迫时提高 40.45%。

2.3.2 干旱胁迫对玉米雄穗渗透调节物质含量的影响

如图 3A 所示, 添加土壤改良剂处理雄穗 Pro 含量在轻度干旱胁迫时增长相对较快, 同 CK 相比增加了 25.42%, 在中度干旱胁迫时增长率则稍有减缓, 而原土处理的雄穗 Pro 含量变化则与之相反; 在重度干旱胁迫时, 2 种土壤处理雄穗中的 Pro 含量都显著提升, 同 CK 相比分别增加了 53.48% 以及 53.64%, 但 2 种土壤处理间差异明显。

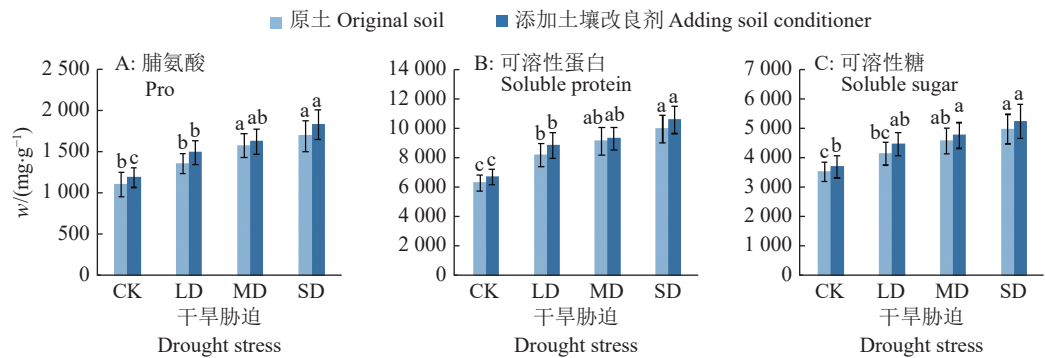
如图 3B 所示, 干旱胁迫显著增加了玉米雄穗的可溶性蛋白含量。正常供水时, 2 种土壤处理雄穗的可溶性蛋白含量未有明显差异; 在轻度干旱胁迫下, 2 种处理雄穗的可溶性蛋白含量均有所上升, 但添加土壤改良剂处理的雄穗可溶性蛋白分泌水

平较高, 原土处理中的可溶性蛋白分泌水平相对较弱; 中度干旱胁迫时, 原土处理与土壤改良剂处理中的雄穗可溶性蛋白含量同 CK 相比均有大幅度上升, 增幅分别为 45.38% 以及 39.79%; 重度干旱胁迫时, 2 种土壤处理雄穗中的可溶性蛋白含量均达到峰值, 其中添加土壤改良剂处理的雄穗可溶性蛋白变化相对显著, 同 CK 相比增加了 59.17%。

如图 3C 所示, 雄穗的可溶性糖含量也随干旱程度加重而增加。在轻度干旱胁迫时, 添加土壤改良剂处理的雄穗可溶性糖含量变化较为明显, 同 CK 相比上升了 20.77%, 原土处理上升了 17.27%; 在中度干旱胁迫时, 原土处理雄穗对干旱反应较为敏感, 可溶性糖含量同 CK 相比增加了 29.61%, 添加土壤改良剂处理的雄穗可溶性糖分泌能力则相对较弱一点; 在重度干旱胁迫时, 2 种土壤处理雄穗中的可溶性糖含量均有所提高, 但二者间未有明显差异。

2.4 干旱胁迫对玉米产量性状的影响

由表 3 可知, 在抽雄期进行干旱胁迫会导致玉米产量严重降低, 干旱程度对玉米产量的影响具体表现为重度干旱胁迫>中度干旱胁迫>轻度干旱胁迫。



CK: 正常供水, LD: 轻度干旱胁迫, MD: 中度干旱胁迫, SD: 重度干旱胁迫; 各小图中相同土壤处理不同干旱胁迫程度柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

CK: Normal water supply, LD: Light drought stress, MD: Moderate drought stress, SD: Severe drought stress; Different lowercase letters on the columns of different drought stress degrees in the same soil treatment in each figure indicate significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

图 3 干旱胁迫对玉米雄穗渗透调节物质含量的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on the content of osmotic adjustment substances in maize tassels

表 3 干旱胁迫对玉米产量性状的影响¹⁾

Table 3 Effects of drought stress on maize yield characteristics

土壤处理 Soil treatment	干旱胁迫 Drought stress	穗长/cm Spike length	秃尖长/cm Bald tip length	穗粗/cm Spike thickness	行数 Row number	行粒数 Row grain number	百粒质量/g 100-grain weight	单株产量/g Yield per plant
原土 Original soil	CK	16.17±1.53a	0.37±0.32c	2.47±0.35a	18.67±2.31a	25.67±3.79a	37.92±0.76a	134.62±5.60a
	LD	14.00±0.50b	0.87±0.32bc	2.13±0.23ab	17.33±2.83ab	22.33±3.21b	34.79±0.90b	110.66±5.55b
	MD	11.17±1.61c	1.60±0.4ab	1.93±0.12bc	11.30±5.03bc	15.00±2.00c	30.82±1.28c	76.28±2.95c
	SD	7.17±0.76c	2.10±0.79a	1.50±0.2c	9.33±3.79c	5.67±2.52c	27.77±1.15d	50.63±2.90d
添加土壤改 良剂 Adding soil conditioner	CK	16.33±0.29a	0.17±0.29c	2.73±0.25a	19.33±6.73a	29.33±2.08a	40.56±1.32a	163.14±5.04a
	LD	14.83±0.58b	0.63±0.25bc	2.33±0.15a	17.33±1.00a	27.00±2.00b	39.09±1.90a	117.47±5.83b
	MD	13.50±0.5c	0.90±0.46ab	2.03±0.06b	14.67±1.91b	23.67±3.21bc	35.12±2.51b	100.56±5.38c
	SD	10.67±0.58d	1.50±0.40a	1.77±0.06c	12.00±1.91c	12.33±3.06c	31.31±1.47c	68.89±0.53d

1) CK: 正常供水, LD: 轻度干旱胁迫, MD: 中度干旱胁迫, SD: 重度干旱胁迫; 相同土壤处理同列数据后的不同小写字母表示不同干旱胁迫程度间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

1) CK: Normal water supply, LD: Light drought stress, MD: Moderate drought stress, SD: Severe drought stress; Different lowercase letters in the same column of the same soil treatment indicate significant differences among different drought stress degrees ($P<0.05$, Duncan's method)

迫>正常供水。轻度干旱胁迫对 2 种土壤处理的玉米穗长、行数、行粒数以及百粒质量影响较小;但在中度以及重度干旱胁迫时,玉米的穗长、行数以及行粒数均受干旱影响显著,在重度干旱胁迫时,原土处理的玉米穗长、行数、行粒数以及百粒质量同 CK 相比分别降低了 55.67%、50.00%、77.92% 以及 26.77%,土壤改良剂处理则降低了 34.66%、37.93%、57.95% 以及 22.81%。玉米果穗的秃尖长受干旱影响显著,具体表现为随干旱程度加剧果穗秃尖变长,在重度干旱胁迫时,原土处理与添加土壤改良剂处理的果穗秃尖长度较 CK 相比分别增长了 4.68 倍以及 7.82 倍。玉米果穗穗长、穗粗、行

数、行粒数以及百粒质量均随着干旱胁迫程度加剧而降低,进而导致玉米产量严重下降。在各胁迫水平中,添加土壤改良剂处理的玉米产量以及果穗穗部性状都明显优于原土处理的。

2.5 玉米抽雄吐丝间隔与产量的关系

由表 4 可知,玉米抽雄吐丝间隔与果穗秃尖长呈显著正相关,与玉米产量、百粒质量、行粒数以及行数呈极显著负相关;果穗秃尖长与玉米产量、百粒质量、行粒数以及行数呈极显著负相关;行数、行粒数以及百粒质量均和玉米产量呈极显著正相关。这说明干旱胁迫延长玉米的抽雄吐丝间隔会导致雌雄穗抽雄吐丝不同步,对授粉造成严重影响,进

表 4 玉米抽雄吐丝间隔与产量构成因素的相关分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis between tasseling-silking interval and output composition of maize

性状 Trait	抽雄吐丝间隔 Anthesis-silking interval	秃尖长 Bald tip length	行数 Row number	行粒数 Row grain number	百粒质量 100-grain weight
秃尖长 Bald tip length	0.968*				
行数 Row number	-0.956**	-0.980**			
行粒数 Row grain number	-0.947**	-0.973**	0.947**		
百粒质量 100-grain weight	-0.925**	-0.967**	0.940**	0.950**	
单株产量 Yield per plant	-0.975**	-0.980**	0.964**	0.949**	0.935**

1) “*” 和 “**” 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关(Pearson法)
1) “*” and “**” indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ respectively (Pearson method)

而对玉米产量造成一定影响。因此，玉米抽雄吐丝间隔与产量有着密切联系。

3 讨论与结论

穗期是玉米雄穗生长发育的重要时期，也是对水分需求最敏感的时期，若在此时水分亏缺则不利于雄穗正常生长以及维持内部正常生理特性^[18]。本研究发现：干旱胁迫导致玉米雄穗主轴长度、粗度以及分枝数均不同程度地减少，且下降程度随干旱胁迫程度加重而增大，这与贾波等^[19]的研究结果基本一致；适当的干旱有利于雄穗干物质积累，可促进其发育；干旱胁迫同样导致玉米抽雄吐丝间隔增大，引起雌雄穗抽雄吐丝不同步，对后续玉米授粉工作造成严重影响。通过对玉米抽雄吐丝间隔与产量的相关性分析发现：抽雄吐丝间隔与玉米产量呈极显著负相关，这与王艺焯等^[20]的研究结果相类似。本研究还发现施用土壤改良剂可以在一定程度上改善盐碱土的保水能力，减小干旱胁迫对玉米雄穗的消极影响，同原土处理相比，其雄穗穗部性状、抽雄吐丝间隔以及产量受干旱胁迫影响相对较小。

在干旱条件下，玉米细胞失水达到一定程度时会产生大量活性氧分子，这些氧自由基会造成细胞膜氧化损伤，诱导其脂质化，产生大量MDA，大量的活性氧和MDA会改变细胞膜的流动性和通透性，最终导致细胞的结构和功能发生改变。这种过度的损伤促使玉米雄穗内部分泌抗氧化系统酶(如SOD、POD和CAT)来消除这种副作用^[21-22]。本研究发现：随着干旱胁迫程度加剧，2种土壤处理雄穗内部的SOD、POD和CAT活性均呈现先升后降的趋势，结合前期对干旱影响玉米生理调节机制的研究^[23]分析，导致此变化趋势的原因可能是重度干旱胁迫对雄穗细胞造成一定损伤，内部抗氧化系统酶无法过量分泌进而无法消除分解雄穗内产生的过

多的活性氧以及MDA。在干旱胁迫前期，添加土壤改良剂处理雄穗内部抗氧化系统酶分泌速率较快，在中后期则有所减缓，出现此现象的原因可能是在胁迫前期土壤改良剂在土壤中会快速吸收水分，从而维持一定含水量，进而造成土壤中水分匮乏加剧，刺激玉米雄穗分泌抗氧化系统酶抵御干旱带来的损害，这与周客等^[24]和田丽等^[25]对土壤改良剂的研究结果相符合；而在胁迫中后期，土壤改良剂中会释放出一部分水分供应植株生长，此时玉米植株缺水情况有所缓解，使其雄穗内部抗氧化系统酶分泌速率减缓。在不同干旱程度胁迫下，SOD活性变化在2种土壤处理中均无明显差异且其含量较高，这表明在干旱条件下SOD对玉米雄穗的重要性。本研究结果与前期的研究结果^[26]相类似。

已有研究表明，干旱条件下玉米无法正常从土壤中吸取水分，细胞因失水导致细胞内外渗透压不一致，从而造成细胞皱缩且活性下降。在这种逆境条件下，雄穗内部会大量分泌并积累渗透调节物质(如Pro、可溶性糖以及可溶性蛋白)，从而降低细胞水势，维持细胞内外渗透压一致，使雄穗能正常生长发育，完成后期授粉工作^[27-28]。本研究发现，渗透调节物质含量变化受干旱胁迫影响显著，2种土壤处理雄穗的渗透调节物质含量变化均是在重度胁迫时达到峰值，这表明玉米可以通过增加体内渗透调节物质含量来避免胁迫所带来的损伤，渗透调节物质在调节细胞内外因干旱胁迫而产生的渗透压时发挥着重要作用。本研究还发现渗透调节物质含量变化和抗氧化系统酶变化趋势基本一致，说明渗透调节在干旱条件下可以保护有利于清除活性氧的酶活性，这与前人的研究结果^[29-30]基本一致。

本研究发现，干旱胁迫严重影响玉米雄穗生长发育以及产量，施用土壤改良剂可以在一定程度上缓解干旱对植株产生的负作用，轻度干旱胁迫促进玉米雄穗发育，但重度干旱胁迫时，雄穗内部有害

物质分泌过多, 抗氧化系统酶以及渗透调节物质无法正常发挥作用, 对雄穗造成不可逆伤害。干旱胁迫同样会造成玉米抽雄吐丝间隔的延长, 从而严重降低玉米产量。因此在玉米抽雄期至吐丝期做好保水工作是抗旱保产的首要任务。

参考文献:

[1] 杨若子. 东北玉米主要农业气象灾害的时空特征与风险综合评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.

[2] 倪深海, 顾颖, 彭岳津, 等. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 176-181.

[3] 张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 东北地区玉米干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 231-236.

[4] LI W, HAO Z, PANG J, et al. Effect of water-deficit on tassel development in maize[J]. Gene, 2019, 681: 86-92.

[5] 贾双杰, 李红伟, 江艳平, 等. 干旱胁迫对玉米叶片光合特性和穗发育特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 854-863.

[6] MAAZOU A-R S, TU J, QIU J, et al. Breeding for drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) [J]. American Journal of Plant Sciences, 2016, 7(14): 1858-1870

[7] 宋凤斌, 戴俊英. 玉米对干旱胁迫的反应和适应性 II: 玉米雌穗和雄穗生长发育对干旱胁迫的反应[J]. 吉林农业大学学报, 2005(1): 1-5.

[8] FATHI A, TARI D B. Effect of drought stress and its mechanism in plants[J]. International Journal of Life Sciences, 2016, 10(1). doi: 10.3126/ijls.v10i1.14509.

[9] 杨娟, 姜阳明, 周芳, 等. PEG 模拟干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种苗期形态与生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2021(1): 82-89.

[10] LIU C, LIU Y, GUO K, et al. Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in karst habitats of southwestern China[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 71(2): 174-183.

[11] ZAHER-ARA T, BORROOMAND N, SADAT-HOSEINI M. Physiological and morphological response to drought stress in seedlings of ten citrus[J]. Trees, 2016, 30(3): 985-993.

[12] 杨晓龙. 不同生育期干旱胁迫对水稻产量品质影响的生理机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.

[13] 张凤路, KIRUBI D. 玉米雌雄穗开花间隔与产量关系研究[J]. 作物学报, 2002(1): 76-78.

[14] 郭江, 石中泉, 张凤路, 等. 玉米的雌雄穗开花间隔对产量的影响及其潜在原因研究[J]. 玉米科学, 2004(S2): 20-22.

[15] 郭艳阳, 刘佳, 朱亚利, 等. 玉米叶片光合和抗氧化酶活

性对干旱胁迫的响应[J]. 植物生理学报, 2018, 54(12): 1839-1846.

[16] 张永福, 黄鹤平, 银立新, 等. 冷(热) 激对干旱胁迫下玉米活性氧清除及膜脂过氧化的调控机制[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 56-60.

[17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.

[18] ARUMINGTYAS E L, WIDORETNO W, INDRIYANI S. Somaclonal variations of soybeans (*Glycine Max. L. Merr*) stimulated by drought stress based on random amplified polymorphic DNAs (RAPDs)[J]. American Journal of Molecular Biology, 2012, 2(1): 85-91.

[19] 贾波, 谢庆春, 蒋学祥, 等. 玉米雄穗主要性状研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(32): 24-26.

[20] 王艺煊, 王瑞莲, 李成, 等. 玉米自交系雌雄穗开花间隔与产量及抗旱性的相关性[J]. 作物研究, 2020, 34(5): 427-430.

[21] 张翠梅. 不同抗旱性紫花苜蓿响应干旱的生理及分子机制研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.

[22] SONG Y, LI J, LIU M, et al. Nitrogen increases drought tolerance in maize seedlings[J]. Functional Plant Biology, 2019, 46(4): 350-359.

[23] 刘佳. 不同抗旱性玉米品种响应干旱及复水的光合生理机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

[24] 周客, 王利书, 程东娟, 等. 保水剂对土壤水分运移和水吸力变化的影响[J]. 节水灌溉, 2021(2): 52-57.

[25] 田丽, 苏改艳, 高平安, 等. 不同土壤改良剂对玉米幼苗生理生长特性的影响[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(3): 20-23.

[26] 张翠梅, 师尚礼, 吴芳. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 868-882.

[27] BLUM A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production[J]. Plant Cell and Environment, 2017, 40(1): 4-10.

[28] 贾斯淳, 王娜, 郝兴宇, 等. 不同干旱胁迫处理对大豆品种生长及逆境生理的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 137-144.

[29] XU H, LU Y, XIE Z, et al. Changes in nitrogen metabolism and antioxidant enzyme activities of maize tassel in black soils region of northeast China[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 515.

[30] EFEOĞLU B, EKMEKÇİ Y, ÇİÇEK N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery[J]. South African Journal of Botany, 2009, 75(1): 34-42.

【责任编辑 李庆玲】