

添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米气孔特征和光合特性的影响

张浩¹, 郭婷¹, 吴子龙¹, 叶嘉¹, 张雨博¹, 邢浩春¹,
高伟¹, 戴川景¹, 郑云普²

(1. 邯郸学院生命科学与工程学院, 河北 邯郸 056005; 2. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 以玉米为试验材料, 设置5个处理, 盐胁迫下添加蚯蚓粪比例分别为0%、10%、20%、40%, 以不添加蚯蚓粪和NaCl溶液的处理为空白对照, 分析盐胁迫下添加蚯蚓粪对玉米气孔特征和光合特性的影响。结果表明, 添加蚯蚓粪能够显著增加盐胁迫下玉米叶片近轴面的气孔长度、气孔面积和气孔周长, 远轴面气孔长度和气孔周长也随着蚯蚓粪的添加显著增加, 玉米叶片近轴面和远轴面气孔空间分布在添加蚯蚓粪处理变得更加规则。添加蚯蚓粪处理后玉米幼苗的净光合速率、胞间二氧化碳浓度和气孔导度与盐胁迫处理相比显著升高, 同时玉米幼苗的水分利用效率显著升高。添加蚯蚓粪能有效增大盐胁迫下玉米幼苗叶片的最大光化学转化效率, 降低相对电导率, 缓解盐胁迫对玉米的伤害。

关键词: 玉米; 蚯蚓粪; NaCl盐胁迫; 光合作用; 气孔特征

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effects of Vermicompost on Stomatal Traits and Leaf Photosynthesis of Maize Seedlings under the Salt Stress

ZHANG Hao¹, GUO Ting¹, WU Zi-long¹, YE Jia¹, ZHANG Yu-bo¹, XING Hao-chun¹,
GAO Wei¹, DAI Chuan-jing¹, ZHENG Yun-pu²

(1. College of Life Science and Engineering, Handan University, Handan 056005;

2. School of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: To explore the effect of the interaction between vermicompost and salt stress on the stomatal characteristics and photosynthetic characteristics of maize, five treatments were set with maize as the experimental material. Under the salt stress, the proportions of vermicompost were 0, 10%, 20%, and 40%, respectively. The changes of earthworm manure on the stomatal characteristics and photosynthetic characteristics of maize under salt stress were analyzed with the treatment without vermicompost and NaCl solution as the blank control. The results showed that the addition of vermicompost could significantly increase the stomatal length, stomatal area, and stomatal perimeter of maize leaves under salt stress. At the same time, the length and perimeter of stomata on the abaxial surface also increased significantly with the addition of vermicompost. The spatial distribution of stomata on adaxial and abaxial surfaces of maize leaves became more regular after adding vermicompost. The net photosynthetic rate, intercellular carbon dioxide concentration and stomatal conductance of maize seedlings treated with vermicompost were significantly higher than those treated with salt stress, and the water use efficiency of maize seedlings was increased. The addition of vermicompost can also effectively increase the maximum photochemical transformation efficiency of maize seedling leaves under salt stress, reduce the relative conductivity and alleviate the damage of salt stress to maize.

Key words: Maize; Vermicompost; NaCl salt stress; Photosynthesis; Stomatal trait

录用日期: 2022-03-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071608)、河北省科技支撑计划项目(18226435)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2018325、Z2015014)、邯郸学院校级项目(2018104、XZ2019310)、大学生创新创业项目(202110103001、202110103005)

作者简介: 张浩, 河北保定人, 副教授, 主要从事植物逆境生理方面的研究。E-mail: zhanghao_55@163.com

郑云普为本文通讯作者。E-mail: zhengyunpu_000@sina.com

全世界有超过8亿hm²的耕地受到盐碱化的影响。在中国,盐碱土地占耕地总数的25%,人们滥用化肥以及灌溉方式的不合理,导致盐碱土的面积日益扩大^[1]。中国是一个粮食生产大国,土地盐碱化会导致大量作物生长不良甚至死亡,严重影响作物产量。大量研究表明,盐胁迫会通过降低植物的光合速率和生理代谢活动^[2],进一步影响植物的生长和发育。因此,如何缓解盐碱土对植物生长发育过程的伤害,是目前研究的热点问题之一。

蚯蚓粪是蚯蚓生物降解有机物后形成的产物,是一种天然的生态有机肥料,富含有机氮、腐殖质等物质^[3]。蚯蚓粪的加入,不仅可以修复被Cu²⁺、Zn²⁺污染的土壤,增加有机质含量,恢复其生态功能^[4,5],还可以改善土壤中的微生物数量,降低土壤pH值,提高阳离子交换量等,从而缓解盐渍土对植物的伤害。黄忠阳等研究发现,施加蚯蚓粪能提高小白菜产量,降低其硝酸盐含量^[6]。此外,蚯蚓粪还被广泛应用于油菜^[7]、小麦^[8]等作物栽培,均能显著提高植物抗逆性和产量。目前,关于添加蚯蚓粪对作物产量、品质、抗氧化酶活性、土壤养分、土壤微生物影响的研究较多^[9,10]。添加蚯蚓粪如何缓解盐胁迫对植物光合作用的影响,促进植物生物量积累的相关报道不多。光合作用的实质是干物质积累的过程,光合速率的升高会显著增加植物生物量的积累,但是光合速率对外界环境变化极其敏感。植物的光合速率变化通常受气孔因素^[11]和非气孔因素^[12]所影响。植物的光合速率变化是气孔因素影响还是非气孔影响,目前尚无一致结论^[13]。因此,探讨添加蚯蚓粪和盐碱化的交互作用对植物气孔特征和光合特性的影响显得尤为重要。

玉米是清洁汽油、畜牧饲料的重要来源,也是我国北方人民的重要粮食之一。由于我国盐渍土面积的不断扩大,已经威胁到了许多地区玉米产量,引发了粮食供应安全问题^[14]。本研究以北方重要的粮食作物玉米为试验材料,通过向盐胁迫下基质添加不同比例的蚯蚓粪,测定各处理组玉米幼苗的气孔特征、气体交换参数和叶绿素荧光参数等,为盐碱地上合理种植玉米提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽容器采用底部打孔的花盆(直径30 cm、高度20 cm),土壤来源为邯郸学院校园北林区,采样深度为0~20 cm。蚯蚓粪购买于邯郸市金益农生物科技有限公司,蚯蚓粪有机质质量分数(以烘干基计)

56%,总养分(氮+五氧化二磷+氧化钾)的质量分数(以烘干基计)6%。玉米种子购买于邯郸市农业科学院,品种为京科665。土壤采样后暴晒、过筛,与蚯蚓粪按比例混匀。

1.2 试验设计

挑选饱满、大小一致的玉米种子,用10%双氧水(H₂O₂)消毒浸泡30 min,再用无菌水反复冲洗4次。采用盆栽方式培育,盆栽容器为底部打孔的花盆。盆栽基质采用0~20 cm的园林土,基质持水量为47%,pH值为7,有机质5.84 g/kg、全氮0.63 g/kg、全磷0.38 g/kg、速效钾57 mg/kg。共设5个处理,分别为处理1(纯园林土,CK1)、处理2(园林土,盐胁迫,CK2)、处理3(添加蚯蚓粪10%,盐胁迫)、处理4(添加蚯蚓粪20%,盐胁迫)、处理5(添加蚯蚓粪40%,盐胁迫)。每个花盆总基质干重为2 500 g,每个处理4次重复。待幼苗长至2叶1心时,向各处理盆栽添加NaCl溶液来模拟盐胁迫环境。每个盆栽加入NaCl溶液500 mL,浓度为150 mmol/L,CK组(处理1)加入500 mL蒸馏水。每周施加1次,连续施加3周,随后每隔3 d用清水浇水500 mL。幼苗生长至60 d后,测定植物叶片的气孔特征、气体交换参数和叶绿素荧光参数。

1.3 试验方法

1.3.1 玉米叶片气孔的测定

采集时间选择上午10:00左右,对每个处理随机选取3片新生叶片,利用指甲油涂抹到叶片表面,对叶片近轴面和远轴面气孔进行采样,制成临时装片。每个处理随机选择6个视野,采用Motic Images Advanced 3.2软件拍照测量,最后再算出气孔形状指数^[15]。气孔形状指数的计算公式:

$$S = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

式中, S 为叶片气孔形状指数, P 表示气孔周长, A 表示气孔面积。

1.3.2 玉米气孔的空间分布格局分析

随机选取各处理临时气孔装片,利用ArcGIS 10.0软件对气孔的所在位置进行数字化处理,再采用空间统计分析方法Ripley's K -Function对数字化后表征气孔分布状况的点进行空间格局分析,探讨气孔分布的特征。分析结果由Lhat(d)值来表达:

$$\text{Lhat}(d) = \sqrt{\frac{K(d)}{\pi}} - d$$

假设在给定尺度 d 下,如果Lhat(d)值在95%可信任区间之内,气孔呈随机分布;如果Lhat(d)值小于95%可信任区间,气孔为规则分布;如果Lhat(d)

值大于95%可信区间时,气孔呈簇状分布^[16]。

1.3.3 玉米叶片气体交换参数测定

每个处理挑选从顶部开始数第2~3个叶片,利用便携式光合仪(FMS-2)测定净光合速率(P_n)、胞间CO₂浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)。设定叶室温度为25℃,光照强度为960 μmol/(m²·s)。水分利用效率(WUE)利用 P_n / T_r 计算得出^[17]。

1.3.4 叶绿素荧光参数和相对电导率的测定

每个处理选取长势一致、无黄化现象且叶龄相同的植株。利用便携式调制荧光分析仪(OS-30P)测定PS II最大光化学效率(F_v/F_m)。每个处理5次重复。相对电导率采用浸泡法测定^[18]。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2010 软件统计各参数的平均值和标准差,采用SPSS 18.0进行单因素方差分析和多重比较($P<0.05$),利用Excel 2010软件制图。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米幼苗气孔特征的影响

从表1可以看出,盐胁迫(CK2)下,气孔长度与CK1(处理1)相比差异不显著。随着蚯蚓粪添加量的增加,气孔长度逐渐升高,处理5气孔长度达到最

大,与CK2相比,气孔长度增加了19.4%。处理3、处理4与CK2相比,气孔宽度分别减少了23.1%和15.4%;CK2比CK1气孔宽度略有减少且差异不显著。处理3与处CK2相比,气孔周长差异不显著;处理4和处理5分别比CK2的气孔周长增加了15.0%和19.5%,但两者之间差异不显著($P>0.05$)。随着蚯蚓粪浓度的增加,CK2玉米叶片的气孔面积与CK1相比差异不显著;处理5气孔面积达到最大,分别是CK1和CK2的1.13、1.19倍。添加不同浓度蚯蚓粪均能提高气孔形状指数,处理3、处理4和处理5的叶片的气孔形状指数与CK2相比,分别增加了12.5%、18.8%和12.5%,但三者之间气孔形状指数差异不显著。

处理5叶片远轴面气孔长度达到最大,比CK2气孔长度增加了19.4%。蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米远轴面叶片的气孔宽度和气孔面积影响不显著($P>0.05$)。CK2与CK1相比,气孔周长差异不显著;蚯蚓粪处理4和处理5与CK1相比,气孔周长均增加了6.2%和12.3%($P<0.01$),在处理5中达到最大,比蚯蚓粪CK2增加了18.8%。添加蚯蚓粪对NaCl盐胁迫下玉米叶片近轴面和远轴面气孔密度的均影响不显著($P>0.05$)。

表1 添加蚯蚓粪对NaCl盐胁迫下玉米气孔形态特征的影响						
Table 1 Effects of vermicompost addition on morphological characteristics of stomata in maize under NaCl stress						
气孔特征		处理1(CK1)	处理2(CK2)	处理3	处理4	处理5
Stomatal traits between leaf surfaces		Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4	Treatment 5
近轴面	气孔密度(个/mm ²)	52.7±6.5 a	61.7±10.1 a	56.0±4.6 a	55.0±4.4 a	55.0±6.0 a
	气孔长度(μm)	35.9±4.3 bc	34.6±4.1 c	34.9±2.5 c	39.7±2.9 ab	41.3±3.5 a
	气孔宽度(μm)	5.3±0.8 a	5.2±0.3 a	4.0±0.6 b	4.4±0.4 b	5.4±0.4 a
	气孔周长(μm)	83.5±7.7 b	80.6±6.6 b	81.2±4.6 b	92.7±9.3 a	96.3±53.9 a
	气孔面积(μm ²)	201.5±15.8 ab	191.4±20.9 bc	167.7±11.3 c	194.7±33.9 bc	228.5±34.5 a
	气孔形状指数(%)	1.66±0.1 bc	1.64±0.1 c	1.77±0.1 ab	1.88±0.1 a	1.81±0.1 a
远轴面	气孔密度(个/mm ²)	82.3±5.0 a	87.7±4.2 a	81.7±18.4 a	69.7±7.6 a	86.3±7.1 a
	气孔长度(μm)	37.9±6.0 bc	34.7±3.5 c	41.0±3.8 ab	38.2±2.0 bc	43.1±3.2 a
	气孔宽度(μm)	4.7±0.6 a	5.5±0.8 a	5.4±0.8 a	5.0±0.5 a	4.9±0.4 a
	气孔周长(μm)	85.1±9.7 bc	81.2±6.2 c	87.3±5.6 bc	90.4±3.2 ab	95.6±3.2 a
	气孔面积(μm ²)	202.7±46.9 a	203.7±28.2 a	236.6±20.2 a	203.4±17.3 a	210.4±17.8 a
	气孔形状指数(%)	1.7±0.1 b	1.6±0.1 b	1.8±0.1 ab	1.7±0.1 b	1.9±0.1 a

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下表、下图同。
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between treatments($P<0.05$). The same below.

2.2 蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米幼苗气孔空间分布格局的影响

由图1可知,添加不同含量蚯蚓粪处理,玉米叶片近轴面气孔空间分布在小尺度范围25~140 μm

为规则分布;在大尺度范围150~500 μm呈随机分布。处理4玉米叶片的气孔分布比CK2、处理3、处理5及CK1的气孔分布更加规则,在相同尺度下处理4的Lhat(d)值更小。玉米叶片远轴面气孔空间分

布,在处理3中,玉米叶片的气孔分布比CK2、处理4、处理5及CK1的气孔分布更加规则,在相同尺度

下处理3的Lhat(d)值更小。除此之外,处理4在小尺度240 μm 左右为规则分布。

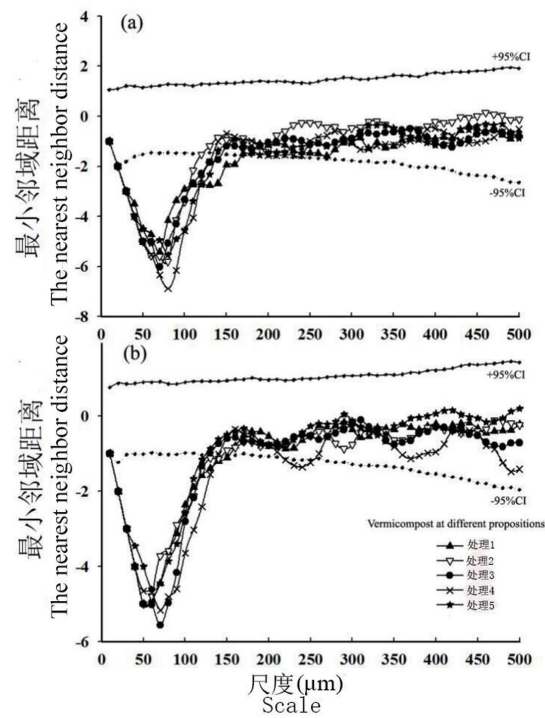


图1 添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米幼苗气孔空间分布格局的影响

Fig.1 Effect of vermicompost addition on stomatal spatial distribution pattern of maize seedlings under salt stress

2.3 添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 的影响

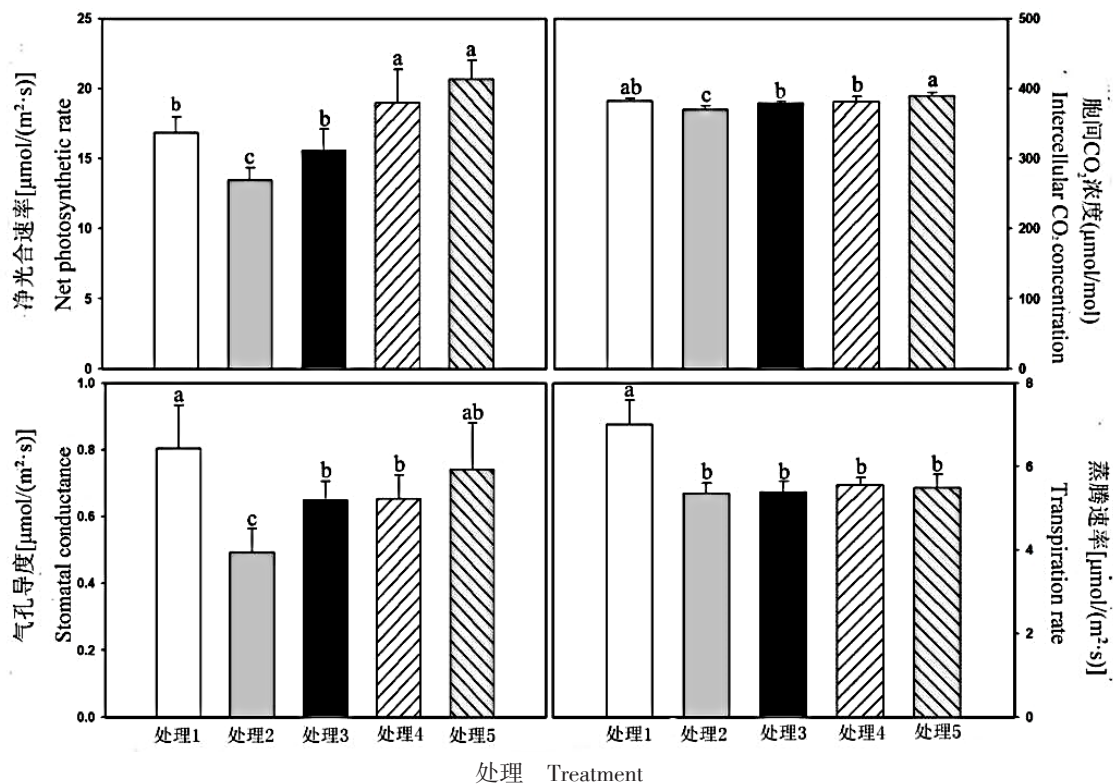


图2 添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米光合相关参数的影响

Fig.2 Effects of vermicompost addition on photosynthetic parameters of maize under salt stress

由图2可知,随着蚯蚓粪比例的增加,叶片净光合速率(P_n)在不断增加,处理5叶片净光合速率达到最大,玉米叶片净光合速率与CK1相比高12.5% ($P<0.05$),与处理2相比高53.2% ($P<0.01$),说明蚯蚓粪的添加有利于提高盐胁迫玉米净光合速率。对于蒸腾速率(T)而言,各处理组中CK1的蒸腾速率最大,其他处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。CK2玉米叶片气孔导度显著下降,与CK1相比减少了38.8% ($P<0.05$);添加蚯蚓粪后,气孔导度显著上升,处理3、处理4和处理5与CK2相比分别上升了32.7%、34.7%、51.0%。CK2玉米叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)显著低于CK1,比CK1减少了3.3%;添加蚯蚓粪处理后,

叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)呈逐渐上升趋势,处理5叶片胞间 CO_2 浓度达到最大,是CK2的1.05倍。

2.4 添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米WUE的影响

水分利用效率(WUE)能从一定层面反映植物对水的利用情况,是植物存活的关键指标。由图3可知,添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米叶片的水分利用效率有着极显著影响 ($P<0.01$),CK2与CK1水分利用效率差异不显著 ($P>0.05$)。随着蚯蚓粪比例的不断增加,玉米叶片水分利用效率呈上升趋势,处理3、处理4和处理5与CK2相比分别提高了11.6%、35.9%、49.4%;处理5与处理4相比,玉米水分利用效率的影响差异不显著 ($P>0.05$)。

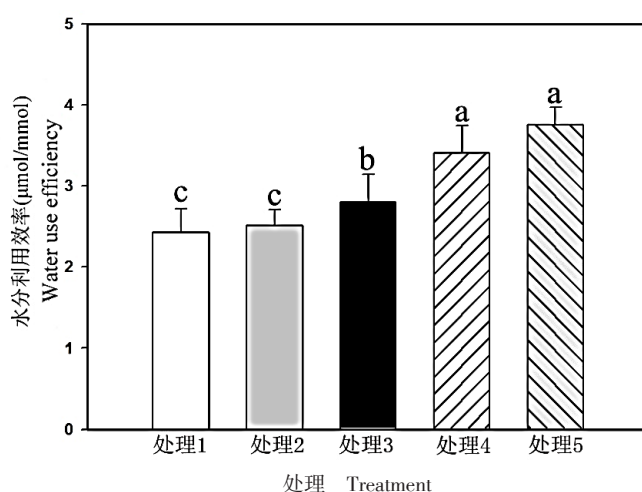


图3 添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米水分利用效率的影响

Fig.3 Effects of vermicompost addition on water use efficiency of maize under salt stress

2.5 蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米幼苗PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和相对电导率的影响

由图4可以看出,添加不同含量蚯蚓粪,盐胁迫下玉米叶片相对电导率存在极显著差异 ($P<0.01$),CK2玉米叶片相对电导率最大,与CK1相比增加了

18.6%。添加蚯蚓粪后,玉米叶片相对电导率开始减小,处理4相对电导率最小,与CK2相比,减少32.9%;处理5比CK2相对电导率减少了24.3%,且均存在显著差异 ($P<0.05$);处理4和处理5之间叶片相对电导率差异不显著。研究表明,盐胁迫会导致

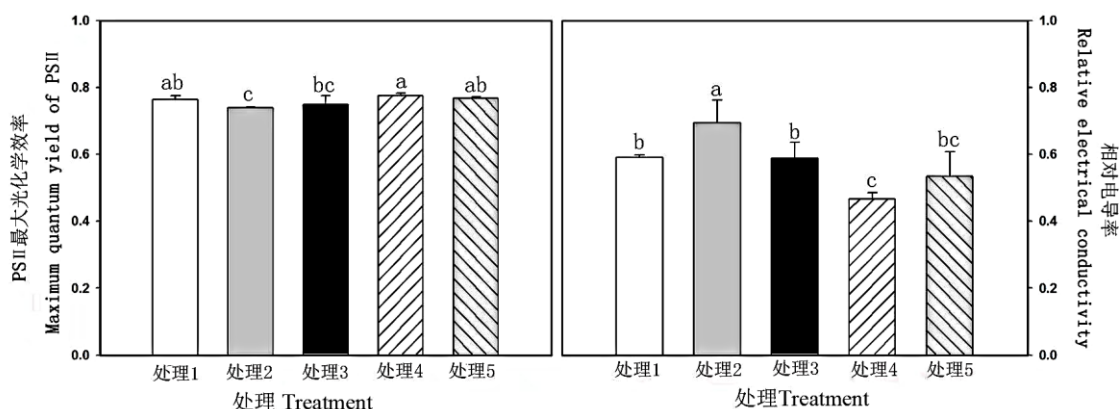


图4 添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米叶片PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和相对电导率的影响

Fig.4 Effect of vermicompost content on F_v/F_m and relative conductivity of maize under salt stress

玉米叶片的相对电导率增加,添加蚯蚓粪后会不同程度的降低相对电导率。

添加蚯蚓粪对盐胁迫下玉米叶片PS II最大光化学效率(F_v/F_m)产生了极显著影响($P<0.01$)。CK2与CK1相比,PS II最大光化学效率下降2.6%,处理3玉米叶片 F_v/F_m 与CK2差异不显著;处理4和处理5比CK2分别增加了5.4%和4.1%。

3 结论与讨论

3.1 蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米叶片气孔形态和气孔空间分布格局的影响

气孔是植物与外界环境之间进行水分和气体交换的重要通道。气孔的外部形态对于外界环境水分、温度、盐胁迫、光照^[19~22]的变化非常敏感。研究表明^[23,24],盐胁迫会通过改变植物叶片气孔密度、气孔开度和气孔的空间分布格局,进一步影响光合速率的变化。目前,还未见添加蚯蚓粪对盐胁迫下植物气孔形态影响的相关报道。本研究发现,添加较高浓度蚯蚓粪能显著提高盐胁迫下叶片近轴面气孔长度、气孔面积和气孔周长,提高叶片远轴面的气孔长度和气孔周长,对近轴面和远轴面的气孔密度影响不显著。说明玉米的气孔形态对外部环境特别敏感,添加蚯蚓粪能通过增加气孔的开度缓解盐胁迫的气孔影响,进而提高净光合速率。本研究中,添加蚯蚓粪与盐胁迫下玉米气孔密度影响不大,可能是由于气孔分化和发育是一个较慢的过程,玉米通过调整叶片气孔密度以响应外部环境的变化需要经历更长的时间周期。

3.2 蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米气体交换参数和水分利用效率的影响

光合作用是植物生长发育过程中重要的生理过程之一。光合作用对外部环境的变化非常敏感。通常来说,盐胁迫导致光合速率下降的原因有气孔限制和非气孔限制^[25]。研究表明,添加蚯蚓粪可以通过增加植物叶片内叶绿素含量,进一步提高净光合速率^[26]。徐德福等^[27]研究发现,添加蚯蚓粪可以促进植物对氮的吸收,从而提高香蒲、芦苇、美人蕉的净光合速率。Zuo等^[28]也发现,施用一定浓度的蚯蚓粪能提高草莓的光合速率。关于施加蚯蚓粪如何影响盐胁迫下植物光合速率变化的研究还没有一致结论。本研究中,添加蚯蚓粪后,净光合速率显著升高,气孔导度和胞间二氧化碳浓度也呈升高趋势,说明净光合速率的升高受气孔导度的影响,缓解了盐胁迫下叶片的气孔限制。叶片含水量的增加,有助于增大保卫细胞增压,从而促进气孔开放,增加气孔

导度^[29]。蚯蚓粪的添加增加了土壤中碱解氮的含量^[30],而氮含量的增加会通过增加气孔开度进而增加气孔导度^[31],并最终提高净光合速率。添加蚯蚓粪后作物净光合速率的提高还可能与光合反应相关酶活性的提高^[32]、叶绿素含量的增多^[33]有关。

3.3 蚯蚓粪添加对盐胁迫下玉米幼苗PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和相对电导率的影响

相对电导率可作为衡量细胞的受损伤情况的指标之一。通常情况下,盐胁迫会导致叶片细胞膜透性增加,植物的相对电导率升高。José等^[34]研究表明,添加蚯蚓粪能够显著降低马铃薯块茎中的相对电导率,缓解盐胁迫对马铃薯的伤害。本研究表明,在盐胁迫下玉米幼苗的相对电导率最高,玉米幼苗的细胞膜受到了损伤,膜透性变大。添加蚯蚓粪后玉米叶片相对电导率开始降低,说明蚯蚓粪能够缓解盐胁迫对玉米幼苗细胞膜的伤害,有利于玉米抵抗外界不良环境。此外,当外界环境发生变化,植物叶绿素荧光参数可作为评价植物受损程度的一个重要指标^[35]。PS II最大光化学效率(F_v/F_m)表示植物PS II光反应中心的光的转化效率,在受到外界环境胁迫时, F_v/F_m 会呈明显的下降趋势。Salima等^[36]研究了蚯蚓粪渗滤液对植物抗盐胁迫能力的影响,发现盐胁迫下番茄幼苗在暗适应状态下的最大PS II光化学效率(F_v/F_m)显著下降;当经过蚯蚓粪渗滤液处理后,幼苗显示出了更高的PS II稳定性。在本研究中,盐胁迫后玉米的 F_v/F_m 显著下降,说明盐胁迫环境影响玉米PS II对光能的吸收和转化,从而降低了光转化效率。添加蚯蚓粪后 F_v/F_m 显著上高,说明添加蚯蚓粪能够促进PS II稳定性,增加光转化效率。

NaCl盐胁迫通过气孔和非气孔因素显著降低了玉米的光合速率,添加蚯蚓粪后玉米叶片能通过改变气孔开度和气孔空间分布格局降低气孔限制,通过修复和保护细胞膜透性,缓解非气孔因素对光合速率的限制,提高水分利用效率,缓解盐胁迫环境对自身的伤害,提高玉米的抗盐能力。关于添加蚯蚓粪对提高盐胁迫下玉米耐盐性的机理可能非常复杂,后续研究将从气孔、生理参数和光合相关基因表达等多方面探讨,为盐碱地合理利用提供数据支撑和科学依据。

参考文献:

- [1] Liu L L, Wang B S. Protection of halophytes and their uses for cultivation of saline-alkali soil in China[J]. Biology, 2021, 10(5): 1-11.
- [2] Hnilickova H, Kraus K, Vachova P, et al. Salinity stress affects photosynthesis, malondialdehyde formation, and proline content in *Por-*

- tulaca oleracea* L.[J]. *Plants*, 2021, 10(5): 845–845.
- [3] Lim S L, Wu T Y, Lim P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2015, 95(6): 1143–1156.
- [4] 王丹丹, 巫丽俊, 戴莹, 等. 蚯蚓对锌污染土壤养分状况及锌形态的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1048–1054.
- Wang D D, Wu L J, Dai Y, et al. Effects of earthworm on soil nutrients and Zn chemical forms in Zn contaminated soil[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1048–1054. (in Chinese)
- [5] 赵凤艳, 吴盼盼, 李天来, 等. 蚯蚓粪对设施番茄连作土壤真菌群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3329–3334.
- Zhao F Y, Wu P P, Li T L, et al. Effect of vermicompost on soil fungi community structure under tomato continuous cropping in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12): 3329–3334. (in Chinese)
- [6] 黄忠阳, 杨巍, 常义军, 等. 茶渣蚯蚓粪基质对小白菜幼苗生长的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(5): 863–867.
- Huang Z Y, Yang W, Chang Y J, et al. Effects of tea-leaf wormcast on Chinese cabbage seedling[J]. *Soils*, 2015, 47(5): 863–867. (in Chinese)
- [7] 郭梦成, 李鹏, 张欣, 等. 不同有机物施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 320–326.
- Wu M C, Li P, Zhang X, et al. Effects of different organic matters application on nutrient absorption and utilization in rape and sweet potato rotation mode[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 320–326. (in Chinese)
- [8] Hafez E M, Omara A E D, Alhumayhi F A, et al. Mohamed Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on wheat plants by soil application of vermicompost and biochar[J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 172(2): 587–602.
- [9] 庞月, 史雅静, 王玉荣, 等. 追施蚯蚓粪对西瓜产量、品质及土壤酶活性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2018(6): 35–39.
- Pang Y, Shi Y J, Wang Y R, et al. Effects of topdressing vermicompost on yield, quality, and enzyme activities in rhizosphere soil of watermelon[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018(6): 35–39. (in Chinese)
- [10] 路迎奇, 杨丽娟, 史津玮, 等. 蚯蚓粪用量对温室番茄生长发育与产量和品质的调节[J]. *北方园艺*, 2019, 429(6): 83–88.
- Lu Y Q, Yang L J, Shi J W, et al. Regulation of vermicompost dosage on tomato growth and development and yield and quality in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2019, 429(6): 83–88. (in Chinese)
- [11] 乔滨杰, 王德秋, 高海燕, 等. 干旱胁迫下杨树无性系苗期光合与气孔形态变异研究[J]. *植物研究*, 2020, 40(2): 177–188.
- Qiao B J, Wang D Q, Gao H Y, et al. Photosynthetic and stomatal morphological variation of poplar clones in seedling stage under drought stress[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2020, 40(2): 177–188. (in Chinese)
- [12] 叶子飘, 谢志亮, 段世华, 等. 设施栽培条件下三叶青叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(1): 41–48.
- Ye Z P, Xie Z L, Duan S H, et al. Stomatal and non-stomatal limitation of photosynthesis for *Tetrastigma hemsleyanum* under the condition of facility cultivation[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(1): 41–48. (in Chinese)
- [13] 高冠龙, 冯起, 刘贤德. 自然条件下胡杨叶片光合作用的气孔和非气孔限制[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(11): 182–188.
- Gao G L, Feng Q, Liu X D. Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis of *Populus euphratica* leaves under natural conditions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(11): 182–188. (in Chinese)
- [14] 张浩, 郑云普, 叶嘉, 等. 外源钙离子对盐胁迫玉米气孔特征、光合作用和生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 923–930.
- Zhang H, Zheng Y P, Ye J, et al. Effects of exogenous Ca^{2+} on stomatal traits, photosynthesis and biomass of maize seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 923–930. (in Chinese)
- [15] 黄磊, 姜国斌, 朱玉, 等. 高温对北高丛蓝莓叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 871–879.
- Huang L, Jiang G B, Zhu Y, et al. Effects of high temperature on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of the north highbush blueberry[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 871–879. (in Chinese)
- [16] 张浩, 郭丽丽, 叶嘉, 等. 樱桃番茄叶片气孔特征和气体交换过程对NaCl胁迫的响应[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 107–113.
- Zhang H, Guo L L, Ye J, et al. Responses of leaf stomatal traits and gas exchange process of cherry tomato to NaCl salinity stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(5): 107–113. (in Chinese)
- [17] 郑云普, 徐明, 王建树, 等. 玉米叶片气孔特征及气体交换过程对气候变暖的响应[J]. *作物学报*, 2015, 41(4): 601–612.
- Zheng Y P, Xu M, Wang J S, et al. Responses of the stomatal traits and gas exchange of maize leaves to climate warming[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4): 601–612. (in Chinese)
- [18] 杨猛, 魏玲, 庄文锋, 等. 低温胁迫对玉米幼苗电导率和叶绿素荧光参数的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(1): 90–94.
- Yang M, Wei L, Zhuang W F, et al. Effects of low-temperature stress on electric conductivity and fluorescence parameters of maize seedling[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(1): 90–94. (in Chinese)
- [19] 杨再强, 谭文, 刘朝霞, 等. 土壤水分胁迫对设施番茄叶片气孔特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1234–1240.
- Yang Z Q, Tan W, Liu Z X, et al. Effect of soil water stress on stomatal characters of greenhouse tomato leaves[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5): 1234–1240. (in Chinese)
- [20] 朱玉, 黄磊, 党承华, 等. 高温对蓝莓叶片气孔特征和气体交换参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 218–225.
- Zhu Y, Huang L, Dang C H, et al. Effects of high temperature on leaf stomatal traits and gas exchange parameters of blueberry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 218–225. (in Chinese)
- [21] 郭丽丽, 郝立华, 贾慧慧, 等. NaCl胁迫对两种番茄气孔特征、气体交换参数和生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12):

- 3949–3958.
- Guo L L, Hao L H, Jia H H, et al. Effects of NaCl stress on stomatal traits, leaf gas exchange parameters and biomass of two tomato cultivars[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 3949–3958. (in Chinese)
- [22] 李慧敏,陆晓民,高清海,等. 不同光质对黄秋葵幼苗生长、光合色素和气孔特征的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 62–70.
- Li H M, Lu X M, Gao Q H, et al. Effects of different light qualities on the growth, photosynthetic pigments and stomatal characteristics of okra(*Abelmoschus esculentus*) seedlings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(6): 62–70. (in Chinese)
- [22] Mounkaila H A Kader, 申孝军, 陈津赛, 等. 水盐胁迫下棉花叶片光合的气孔与非气孔限制[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 13–18.
- Mounkaila H A K, Shen X J, Chen J S, et al. Reduction in photosynthesis of cotton seedling under water and salinity stresses is induced by both stomatal and non-stomatal limitations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 13–18. (in Chinese)
- [23] Serkan U, Deniz K, Guray A, et al. The effects of salt stress on expression of *Asg1* gene related stomatal resistance in potato[J]. Mediterranean Agricultural Sciences, 2017, 3: 235–238.
- [24] Zheng Y P, Xu M, Hou R X, et al. Effects of experimental warming on stomatal traits in leaves of maize(*Zea mays* L.)[J]. Ecology and Evolution, 2013, 3: 3095–3111.
- [25] 郑国琦, 许兴, 徐兆桢, 等. 盐胁迫对枸杞光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1355–1359.
- Zheng G Q, Xu X, Xu Z Z, et al. The effect of salt stress on the stomatal and non-stomatal limitation of photosynthesis of *Lycium barbarum*[J]. Acta Botany of Boreal Occident Sinica, 2002, 22(6): 1355–1359. (in Chinese)
- [26] 张浩, 付伟, 吴子龙, 等. 蚯蚓粪对盐胁迫下小麦幼苗生长及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(11): 1357–1363.
- Zhang H, Fu W, Wu Z L, et al. Effect of vermicompost on growth and photosynthetic characteristic of wheat seedling under salt stress[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(11): 1357–1363. (in Chinese)
- [27] 徐德福, 李映雪, 王让会, 等. 蚯蚓对湿地植物光合特性及净化污水能力的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4907–4913.
- Xu D F, Li Y X, Wang R H, et al. Effect of earthworms on the photosynthetic characteristics of wetland plants and their capacity to purify wastewater[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4907–4913. (in Chinese)
- [28] Zuo Y, Zhang J, Zhao R, et al. Application of vermicompost improves strawberry growth and quality through increased photosynthesis rate, free radical scavenging and soil enzymatic activity[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 233: 132–140. (in Chinese)
- [29] 杨凯, 董青君, 李其胜, 等. 餐余蚯蚓粪替代化肥对白菜和西兰花光合、抗氧化性及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 934–942.
- Yang K, Dong Q J, Li Q S, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by vermicompost from food waste on the photosynthesis, antioxidant capacity, and quality of Chinese cabbage and broccoli[J]. Journal Agro-Environment Science, 2021, 40(5): 934–942. (in Chinese)
- [30] 张荣涛, 周东兴, 申雪庆. 蚯蚓粪对盐碱土壤速效养分和碱化指标的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2013(4): 83–86.
- Zhang R T, Zhou D X, Shen X Q. Effect of wormcast on saline soil available nutrient and alkalizing index[J]. Territory & Natural Resources Study, 2013(4): 83–86. (in Chinese)
- [31] 邓鑫, 冉辉, 于庭高, 等. 西北旱区制种玉米灌浆期气孔导度与叶水势对水氮胁迫的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 253–258.
- Deng X, Ran H, Yu T G, et al. Response of stomatal conductance and leaf water potential to water and nitrogen stress during grain-filling period of hybrid seed maize in arid region of the northwestern China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 253–258. (in Chinese)
- [32] 杨凯, 吴倩, 蒲瑶瑶, 等. 熏蒸条件下有机肥部分替代化肥对西瓜光合和氮代谢酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 905–911.
- Yang K, Wu Q, Pu Y Y, et al. Effects of partial substitution for chemical fertilizer by organic fertilizer on activities of photosynthetic enzyme and nitrogen metabolism enzyme of watermelon under Fumigation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(4): 905–911. (in Chinese)
- [33] 张聪俐, 戴军, 周波, 等. 不同比例蚯蚓粪对玉米生长以及土壤肥力特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 137–143.
- Zhang C L, Dai J, Zhou B, et al. Effects of vermicompost at different proportions on the growth of *Zea mays* and soil fertility[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(2): 137–143. (in Chinese)
- [34] José J P G, Miguel A A, Juan J V M, et al. Vermicompost and vermiwash minimized the influence of salinity stress on growth parameters in potato plants[J]. Compost Science & Utilization, 2017, 25(4): 282–287.
- [35] 李全超, 刘洋, 肖瑶宇, 等. 盐胁迫对多花水仙部分生理特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 25(4): 282–287.
- Li Q C, Liu Y, Xiao Y Y, et al. Responses of physiological property and chlorophyll fluorescence characteristics of narcissus to salt stress[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 25(4): 282–287. (in Chinese)
- [36] Salima B, Zahr D, Stanley L, et al. Assessment of the preventive effect of vermicompost on salinity resistance in tomato(*Solanum lycopersicum* cv. Ailsa Craig)[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(6): 1–11.

(责任编辑:姜媛媛)