

引文格式: 刘娇, 姜永雷, 蔺璟煜, 等. 外源硅对干旱胁迫下烟草生长及生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(2): 306–313. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202209009](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202209009)

外源硅对干旱胁迫下烟草生长及生理特性的影响*

刘 娇¹, 姜永雷², 蔺璟煜¹, 黄晓霞^{1**}

(1. 国家林业与草原局西南风景园林工程技术研究中心, 西南林业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650224;

2. 云南省烟草农业科学研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 【目的】探究外源硅对干旱胁迫下烟株生长及生理特性的影响。【方法】以云烟 87 盆栽幼苗为材料, 对其进行良好水分处理 (90%~95% 田间持水量) 与干旱胁迫处理 (35%~40% 田间持水量), 并施用不同含量外源硅肥 (K_2SiO_3 , 0、1.0、1.5、2.0 g/kg), 待烟株长至旺长期 (45 d) 时测定不同处理下烟株的生长形态、生物量、叶片光合色素含量、渗透调节物质含量及抗氧化酶活性。【结果】干旱胁迫下, 烟株的株高、叶片数、单叶面积、生物量、叶片光合色素含量及抗氧化酶活性均较良好水分处理组下降, 而比叶面积和渗透调节物质含量升高; 施加 1.0~2.0 g/kg 外源硅对干旱胁迫下烟草的生长有一定的促进作用, 主要表现为株高、叶片数、单叶面积、比叶面积、总生物量和根冠比增加, 光合色素和渗透调节物质含量增加, 抗氧化酶活性增强, 丙二醛含量显著降低 ($P<0.05$); 且以 2.00 g/kg 硅处理效果最明显。【结论】施用外源硅可缓解干旱胁迫对烟草的伤害, 提高其抗旱性。

关键词: 外源硅; 烟草; 干旱胁迫; 生理特性

中图分类号: S572.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 02-0306-08

Effects of Exogenous Silicon on Growth and Physiological Characteristics of Tobacco under Drought Stress

LIU Jiao¹, JIANG Yonglei², LIN Jingyu¹, HUANG Xiaoxia¹

(1. Southwest Landscape Architecture Engineering Research Center of State Forestry and Grassland Administration, College of Landscape and Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650021, China)

Abstract: [Purpose] To explore the effects of exogenous silicon on the growth and physiological characteristics of tobacco under drought stress. [Methods] Yunyan87 potted seedlings were treated with well water (90%-95% field water holding capacity) and drought stress (35%-40% field water holding capacity), and applied with different contents of exogenous silicon fertilizer (K_2SiO_3 , 0, 1.0, 1.5, 2.0 g/kg). The growth morphology, biomass, photosynthetic pigment content, osmotic regulatory substance content and antioxidant enzyme activity of tobacco plants under different treatments were measured when the tobacco plants grew to the flourishing period (45 days). [Results] Under drought stress, plant height, leaf number, single leaf area, biomass, photosynthetic pigment content

收稿日期: 2022-09-14

修回日期: 2023-04-17

网络首发日期: 2023-05-08

*基金项目: 云南省高层次人才青年拔尖人才项目 (YNWR-QNBJ-2020-222); 云南省科学技术厅基础研究专项 (202001AU070006)。

作者简介: 刘娇 (1998—), 女, 河南开封人, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。

E-mail: 1565732709@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 黄晓霞 (1980—), 女, 四川成都人, 博士, 教授, 主要从事植物分子生理研究。E-mail: huangxx@swfu.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20230506.1625.003.html>



and antioxidant enzyme activity of tobacco plant were decreased, but specific leaf area and osmotic regulatory substance content were increased compared with that of well water treatment group. The application of exogenous silicon of 1.0 to 2.0 g/kg could promote the growth of tobacco under drought stress, and the main effects were increased in plant height, leaf number, leaf area, specific leaf area, total biomass and root-shoot ratio, the contents of photosynthetic pigments and osmotic regulatory substances, and the antioxidant enzyme activities; but the malondialdehyde content was significantly decreased ($P<0.05$). And 2.00 g/kg silicon treatment effect was the most obvious. [Conclusion] Application of exogenous silicon can alleviate the damage of drought stress on tobacco and improve the drought resistance.

Keywords: exogenous silicon; tobacco; drought stress; physiological characteristics

受极端气候变化、水资源短缺以及环境破坏等因素的影响, 全球干旱、半干旱土地面积不断扩大^[1]。干旱已成为世界农林生产最严重的灾害之一, 每年由于干旱胁迫导致的作物减产已超过其他自然灾害造成减产的总和^[2], 提高植物的抗旱性已成为农业生产亟待解决的问题。外源物质是缓解植物干旱胁迫的有效途径之一, 硅是植物逆境响应中的重要营养元素, 已有研究表明: 硅在改善土壤环境, 促进作物生长, 提高植株光合色素含量、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量和养分吸收等方面具有重要作用^[3]。此外, 施硅可以通过提高水分状况、参与植物代谢活动和基因表达、介导能量耗散、影响光合活性、抗氧化防御系统和植物体内矿质元素的平衡等途径减轻干旱胁迫对植株的损伤, 有效提高干旱胁迫下作物的耐旱性, 增加作物产量^[4-5]。郑世英等^[6]研究表明: 硅通过改变植株叶片结构降低蒸腾速率, 从而提高植株保水能力, 促进干旱胁迫下野生大豆的生长; 杨慧颖等^[7]和曾瑞儿等^[8]研究指出: 硅能提高光能转化率、光合速率以及叶片抗氧化酶活性, 降低膜脂过氧化程度, 增强植株的抗旱能力; DESOKY 等^[9]研究认为: 硅能通过增强渗透保护剂以及干旱胁迫下酶促和非酶促防御系统组分的活性, 减少干旱对植株的氧化应激以及植株电解质的膜渗漏和膜脂过氧化, 进而减轻干旱胁迫对蚕豆的伤害; PATEL 等^[10]研究表明: 施硅可促进干旱条件下 2 种花生基因型矿物质养分的吸收和运输, 诱导代谢物积累, 增加激素水平, 参与干旱胁迫和耐受的信号通路, 从而提高 2 种花生基因型的耐旱性。因此, 硅在提高作物的耐旱性中发挥着重要作用。

烟草 (*Nicotiana tabacum*) 为茄科 (Solanaceae) 茄属 (*Solanum*) 草本植物, 是中国广泛种植的重要叶用经济作物, 也是增加农民收入的重要组成部分^[11]。作为优质烤烟品种, 云烟 87 是中国各烟区种植面积较广的品种之一^[12], 但近年来由于种植烟草的地区旱情频发导致其产量和品质下降, 制约烟草的经济效益^[13]。促进干旱胁迫下烟株生长, 提高其抗干旱能力, 对于促进中国烟草的生产以及推动经济、社会发展具有重要意义。大量研究表明外源硅对提高作物抗逆性有重要作用, 目前关于硅在烟草生产中的应用已有少量报道^[14-15], 而关于硅对缓解烟草干旱胁迫, 尤其是盆栽烟草幼苗对于干旱和外源硅交互处理的生长及生理响应机制尚不清楚。因此, 本研究以云烟 87 为材料, 对良好水分及干旱胁迫下烟草幼苗施用不同用量的硅肥, 研究外源硅及干旱胁迫下烟草的生长形态、光合色素含量、渗透调节物质含量以及抗氧化系统等指标, 探究缓解烟草干旱胁迫的适宜外源硅施用量及其生理机制, 旨在为提高烟草的抗旱能力和合理使用硅肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 8 月上旬—9 月下旬在云南省昆明市西南林业大学后山苗圃大棚内 (N24°23'~26°22', E102°10'~103°40', 海拔 1 995 m) 进行。该地年均温 14.9 °C, 属低纬度高原山地季风气候, 年降水量 1 011.2 mm, 年蒸发量 1 838.3 mm, 相对湿度 74%, 全年无霜期超过 240 d, 年日照时间 2 196.7 h, 日照百分率 56%, 年均总辐射量 5 430 MJ/m² (雨季 2 630 MJ/m², 干季 2 800 MJ/m²)。

1.2 试验材料

供试烟草品种为云烟 87, 由云南省烟草农业科学研究院提供。土壤基质为腐殖土与红土的混合物 ($V_{\text{腐殖土}} : V_{\text{红土}} = 1.5 : 1.0$); 所用硅元素由硅酸钾 (K_2SiO_3) 提供, 购自云南昆明生物科学技术有限公司。

1.3 试验设计

于 2020 年 8 月 2 日选取生长健壮、长势良好的云烟 87 烟草幼苗, 移栽到内径 24 cm、高 30 cm 的塑料盆中, 每盆土 5 kg。外源施硅称取所需质量, 在移栽前拌入土中并混合均匀, 一次性施入。为确保水分不会成为幼苗生长限制的因素, 从移栽开始到干旱胁迫前保证土壤水分充足。烟草缓苗 1 周后采用称重法控制土壤含水量以进行干旱胁迫处理, 为保证干旱水平, 隔天进行称量浇水。通过预试验结果和梁喜龙等^[16]的研究结果确定干旱胁迫程度和硅肥施用量, 采用双因素的完全随机试验设置 2 个土壤水分处理 [良好水分 (90%~95% 田间持水量)、干旱胁迫 (35%~40% 田间持水量)] 和 4 个硅肥处理 (0、1.0、1.5、2.0 g/kg), 共 8 个处理组 (表 1)。每处理 10 盆, 每盆 1 株烟草幼苗, 共 80 盆。试验时间 45 d, 待处理结束后每处理组选择 5 盆进行生长指标测定, 另外 5 盆每株选取中上部完全展开的功能叶片作为生理指标的待测样品。

表 1 试验设计

Tab. 1 Experimental design

处理 treatments	田间持水量/% field capacity	K_2SiO_3 含量/(g·kg ⁻¹) silicon content
CK	90~95	0
W+Si ₁	90~95	1.0
W+Si ₂	90~95	1.5
W+Si ₃	90~95	2.0
D	35~40	0
D+Si ₁	35~40	1.0
D+Si ₂	35~40	1.5
D+Si ₃	35~40	2.0

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长指标的测定

用游标卡尺和卷尺测量株高、叶长和叶宽; 2020 年 9 月 23 日干旱胁迫结束后, 收集所有植株, 将植株根、茎、叶洗净, 放置于烘箱内, 以

105 ℃ 高温杀菌 0.5 h, 65 ℃ 恒温烘至恒质量, 用天平称量植株根、茎、叶及总生物量。按照以下公式计算叶面积、比叶面积和根冠比: 叶面积=最大叶长×最大叶宽×0.6345; 比叶面积=叶面积/叶干质量; 根冠比=根生物量/(茎+叶) 生物量。

1.4.2 叶绿素含量的测定

参照张宪政^[17]的方法, 采用丙酮—乙醇 (等体积比) 混合液浸提法测定叶绿素含量。称取剪碎混匀的烟草叶片 0.2 g 放入试管中, 加入丙酮—乙醇混合液 10 mL, 置于暗处萃取 48 h 至叶片发白 (24 h 后于暗处振荡摇匀 1 次), 萃取结束后取上清液, 采用双光束紫外可见分光光度计 (TU-1901, 北京普析) 分别在 663、646 和 470 nm 处测定吸光度。

1.4.3 抗氧化酶活性的测定

参照高俊凤^[18]的方法, 采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 采用愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性, 采用紫外吸收法测定抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性。

1.4.4 渗透调节物质含量的测定

参照李合生^[19]的方法, 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量, 采用茚三酮比色法测定脯氨酸含量, 采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量; 参照宁朋等^[20]的方法, 采用 GOD-POD 比色法测定可溶性糖和淀粉含量。

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行初步整理, 再采用 SPSS 26.0 进行双因素方差分析 (two-way ANOVA), 采用 Duncan's 检验进行差异显著性分析。所有数据均以“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 外源硅对干旱胁迫下烟草生长形态的影响

由表 2 可知: 烟草株高、叶片数、单叶面积和比叶面积受干旱胁迫和施硅的极显著影响 ($P < 0.001$), 但受干旱与施硅的交互影响不显著 ($P > 0.05$)。与 CK 相比, 干旱处理 (D) 组的株高、叶片数和单叶面积分别显著降低 73.75%、62.05% 和 63.14% ($P < 0.05$); 而比叶面积增加 85.48% ($P > 0.05$); 施加外源硅后, 各干旱胁迫处理组的株高、叶片数、单叶面积和比叶面积均增加或显著增加, 以 2.0 g/kg 硅处理的效果最好。

表 2 外源硅对于旱胁迫下烟草生长形态的影响

Tab. 2 Effects of exogenous silicon on the growth morphology of tobacco under drought stress

处理 treatments	株高/cm plant height	叶片数 leaf number	单叶面积/cm ² single leaf area	比叶面积/cm ² specific leaf area
CK	26.67±0.33 c	9.67±0.33 b	123.94±9.56 c	39.13±6.35 b
W+Si ₁	31.33±0.33 b	10.00±0.00 b	153.55±6.98 b	57.07±3.47 ab
W+Si ₂	32.33±0.33 b	11.00±0.00 b	167.51±4.03 b	55.94±1.89 ab
W+Si ₃	37.33±1.20 a	11.67±0.33 a	208.75±7.32 a	58.36±3.33 ab
D	7.00±0.58 f	3.67±0.33 e	45.68±3.81 e	72.58±16.66 ab
D+Si ₁	11.00±0.58 e	4.00±0.00 de	71.28±2.75 d	88.49±15.62 a
D+Si ₂	12.67±0.33 e	4.67±0.33 d	81.22±5.86 d	90.10±20.41 a
D+Si ₃	15.33±0.33 d	6.00±0.58 c	105.96±7.13 c	75.21±6.95 ab
干旱胁迫 drought stress (D)	***	***	***	**
外源硅 exogenous silicon (Si)	***	***	***	ns
D×Si	ns	ns	ns	ns

注: 各处理组合见表1; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$); *, $P<0.05$, **, $P<0.01$, ***, $P<0.001$, ns. $P>0.05$; 下同。
Note: The treatment combinations are shown in Tab.1; different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$); the same as below.

2.2 外源硅对于旱胁迫下烟草生物量的影响

由表 3 可知: 良好水分条件下, W+Si₃ 处理的叶、茎、根生物量和总生物量均最高, 分别较 CK 增加 10.77%、37.44%、12.32% 和 18.41%, 根冠比在不同硅处理间无显著差异 ($P>0.05$); 与 CK 相比, 干旱处理 (D) 组的叶、茎、根生物量和总

生物量分别显著降低 81.85%、63.01%、75.00% 和 74.51% ($P<0.05$), 施加外源硅后, 茎、根生物量和总生物量与 D 处理相比无显著变化 ($P>0.05$), D+Si₃ 处理的根冠比最大, 较 CK 显著增加 70.35% ($P<0.05$)。

表 3 外源硅对于旱胁迫下烟草单株生物量的影响

Tab. 3 Effects of exogenous silicon on the biomass of per plant tobacco under drought stress

处理 treatments	叶生物量/g leaf biomass	茎生物量/g stem biomass	根生物量/g root biomass	总生物量/g total biomass	根冠比 root/shoot
CK	3.25±0.29 ab	2.19±0.08 b	2.76±0.25 a	8.20±0.56 b	1.99±0.09 b
W+Si ₁	2.70±0.06 c	2.42±0.25 b	2.28±0.52 a	7.39±0.57 b	2.45±0.46 ab
W+Si ₂	3.00±0.11 bc	2.36±0.32 b	2.23±0.32 a	7.59±0.05 b	2.54±0.47 ab
W+Si ₃	3.60±0.21 a	3.01±0.25 a	3.10±0.34 a	9.71±0.53 a	2.18±0.29 ab
D	0.59±0.19 e	0.81±0.10 c	0.69±0.09 b	2.09±0.25 c	2.08±0.31 ab
D+Si ₁	0.86±0.15 e	0.75±0.18 c	0.58±0.09 b	2.18±0.21 c	2.86±0.31 ab
D+Si ₂	0.97±0.16 de	0.82±0.06 c	0.70±0.14 b	2.48±0.27 c	2.74±0.57 ab
D+Si ₃	1.43±0.15 d	0.67±0.04 c	0.64±0.07 b	2.75±0.09 c	3.39±0.56 a
干旱胁迫 drought stress (D)	***	***	***	***	ns
外源硅 exogenous silicon (Si)	**	ns	ns	**	ns
D×Si	ns	ns	ns	ns	ns

2.3 外源硅对于旱胁迫下烟叶光合色素含量的影响

由表 4 可知: 与 CK 相比, 干旱处理 (D) 组的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别显著降低 28.11%、22.36% 和 26.87% ($P<0.05$); 而叶绿素 a/叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别降低 7.20% 和 23.46% ($P>0.05$); 施加外源硅后, 良好水分处

理组与干旱胁迫处理组的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均增加或显著增加, 且都在 2.0 g/kg 硅处理下达到最高值。

2.4 外源硅对于旱胁迫下烟叶丙二醛 (MDA) 含量的影响

由表 5 可知: 与 CK 相比, 干旱处理 (D) 组烟叶的 MDA 含量显著增加 17.22% ($P<0.05$); 随

表 4 外源硅对干旱胁迫下烟草叶片光合色素含量的影响

Tab. 4 Effects of exogenous silicon on the photosynthetic pigments content of tobacco leaves under drought stress					
处理 treatments	叶绿素a/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) chlorophyll a	叶绿素b/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) chlorophyll b	叶绿素a/叶绿素b chlorophyll a/chlorophyll b	总叶绿素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) total chlorophyll	类胡萝卜素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) carotenoid
CK	759.90±5.16 c	210.28±1.27 cd	3.61±0.01 a	970.18±6.37 c	102.41±2.90 de
W+Si ₁	841.38±20.24 b	258.62±8.28 ab	3.26±0.14 b	1 100.00±20.19 b	160.10±3.22 bc
W+Si ₂	898.35±4.49 b	262.65±3.05 a	3.42±0.06 ab	1 161.00±2.84 b	170.12±7.32 b
W+Si ₃	994.51±43.50 a	274.76±25.26 a	3.65±0.17 a	1 269.27±68.52 a	235.36±36.31 a
D	546.27±24.29 d	163.26±6.88 e	3.35±0.07 ab	709.53±30.63 d	78.38±19.95 e
D+Si ₁	600.89±1.08 d	182.82±5.76 de	3.29±0.10 b	783.71±6.73 d	110.72±1.88 cde
D+Si ₂	775.24±20.42 b	226.72±11.77 bc	3.43±0.09 ab	1 001.97±31.87 c	138.89±19.46 bed
D+Si ₃	874.00±3.33 b	266.67±0.91 a	3.28±0.00 b	1 140.67±4.24 b	170.20±1.26 b
干旱胁迫 drought stress (D)	***	***	**	***	**
外源硅 exogenous silicon (Si)	***	***	***	ns	***
D×Si	ns	*	*	ns	ns

表 5 外源硅对干旱胁迫下烟草叶片
丙二醛 (MDA) 含量的影响
Tab. 5 Effects of exogenous silicon on the MDA content in
tobacco leaves under drought stress

处理 treatments	丙二醛含量/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$) MDA content
CK	11.38±0.32 b
W+Si ₁	11.27±0.49 b
W+Si ₂	10.57±0.27 bc
W+Si ₃	8.87±0.86 cd
D	13.34±1.01 a
D+Si ₁	11.44±0.71 b
D+Si ₂	9.54±0.33 bcd
D+Si ₃	8.64±0.19 d
干旱胁迫 drought stress (D)	ns
外源硅 exogenous silicon (Si)	***
D×Si	ns

着施硅量的增大, MDA 含量呈下降的变化趋势; 2.0 g/kg 硅处理时, 良好水分处理组与干旱胁迫处理组的 MDA 含量降至最低, 较 CK 分别显著降低 22.06% 和 24.08% ($P<0.05$)。

2.5 外源硅对干旱胁迫下烟叶渗透调节物质含量的影响

由表 6 可知: 烟叶的渗透调节物质含量受干旱胁迫和施硅的极显著影响 ($P<0.01$, $P<0.001$), 但受干旱与施硅的交互效应不显著 ($P>0.05$)。干旱胁迫下, 与 CK 相比, 干旱处理 (D) 组烟叶的脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量显著增加 ($P<0.05$), 施加外源硅后上述 3 个指标进一步升高, 而仅 D+Si₂ 和 D+Si₃ 处理的淀粉含量显著升高, D+Si₃ 处理的 4 种渗透调节物质含量最高;

良好水分条件下, 外源硅能够不同程度地影响烟叶脯氨酸、淀粉、可溶性蛋白和可溶性糖的含量, 以上指标均随着外源硅施用量的增大呈上升趋势, 且在 W+Si₃ 处理达到最高值。

2.6 外源硅对干旱胁迫下烟叶抗氧化酶活性的影响

由图 1 可知: 干旱胁迫下, 与 CK 相比, 干旱处理 (D) 组烟叶的 SOD、CAT、POD 和 APX 活性显著下降, 分别降低 53.15%、65.21%、49.45% 和 41.15% ($P<0.05$); 外源硅处理后, SOD、CAT、POD 和 APX 活性呈上升趋势, 且 D+Si₃ 处理的 SOD、CAT 和 POD 活性均恢复到对照水平; 良好水分条件下, 外施硅肥后, SOD、CAT、POD 和 APX 活性进一步升高, 且在 W+Si₃ 处理达到最大值。干旱与施硅的交互效应对烟叶的 SOD、CAT 和 APX 活性均有极显著影响 ($P<0.01$ 或 $P<0.001$), 但对 POD 活性影响不显著 ($P>0.05$)。

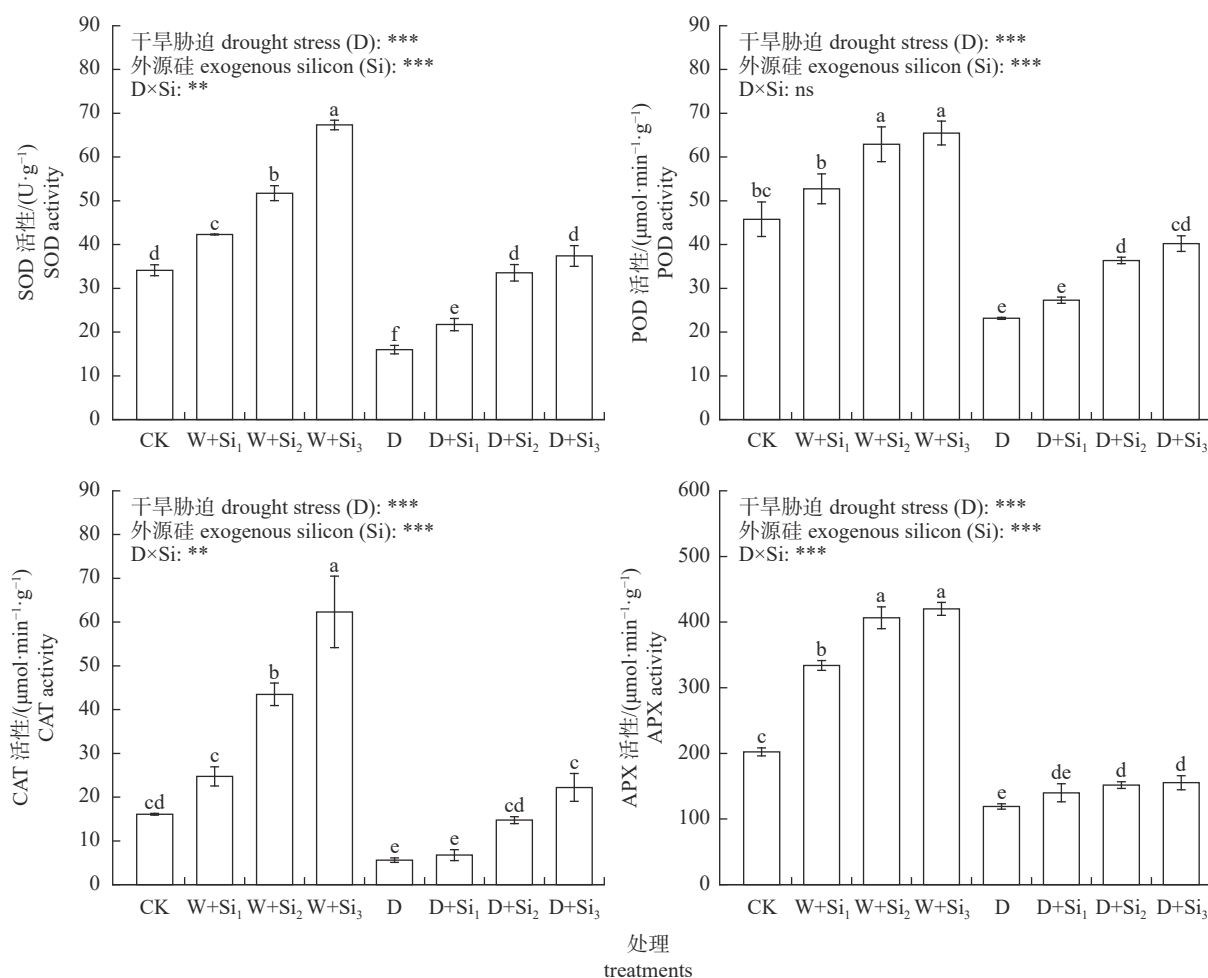
3 讨论

干旱胁迫限制了叶片的光合能力, 阻碍作物生长, 导致作物产量降低, 严重时甚至导致其死亡。有研究表明: 硅肥作为一种土壤调节剂, 在非生物逆境胁迫中能使植物形成硅化细胞, 增强植物叶片光合作用, 从而提高作物抗性^[21]。株高、叶片数、比叶面积和生物量变化是反映干旱胁迫对植物的影响程度与植物抗旱能力的重要指标。本研究中, 干旱胁迫下, 烟株株高、叶片数、单叶面积和生物量等指标均显著下降, 而比叶面积增加, 这可能是由于干旱胁迫使叶片厚度

表 6 外源硅对干旱胁迫下烟草叶片渗透调节物质含量的影响

Tab. 6 Effects of exogenous silicon on the osmotic regulatory substances content in tobacco leaves under drought stress

处理 treatments	脯氨酸含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) proline content	可溶性蛋白含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) soluble protein content	可溶性糖含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) soluble sugar content	淀粉含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) starch content
CK	16.99 $\pm$ 1.38 d	7.77 $\pm$ 3.15 d	40.39 $\pm$ 3.22 f	4.02 $\pm$ 0.12 d
W+Si ₁	39.00 $\pm$ 8.55 d	16.23 $\pm$ 3.48 c	47.18 $\pm$ 4.64 ef	5.82 $\pm$ 0.24 cd
W+Si ₂	43.20 $\pm$ 8.52 d	18.56 $\pm$ 2.28 bc	63.20 $\pm$ 5.78 de	8.80 $\pm$ 0.13 bc
W+Si ₃	85.37 $\pm$ 2.26 c	23.94 $\pm$ 1.76 ab	83.40 $\pm$ 12.00 c	11.84 $\pm$ 0.85 b
D	121.25 $\pm$ 19.29 bc	19.69 $\pm$ 2.84 bc	65.98 $\pm$ 2.12 d	6.74 $\pm$ 1.11 cd
D+Si ₁	125.78 $\pm$ 11.25 bc	21.15 $\pm$ 0.77 abc	96.98 $\pm$ 3.20 bc	7.09 $\pm$ 0.57 cd
D+Si ₂	138.21 $\pm$ 15.14 ab	24.73 $\pm$ 0.51 ab	104.46 $\pm$ 2.58 b	11.32 $\pm$ 0.39 b
D+Si ₃	174.00 $\pm$ 26.18 a	28.31 $\pm$ 1.75 a	127.97 $\pm$ 0.30 a	16.91 $\pm$ 2.92 a
干旱胁迫 drought stress (D)	***	**	***	**
外源硅 exogenous silicon (Si)	**	**	***	***
D $\times$ Si	ns	ns	ns	ns



注: 各处理组合见表 1; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); **, $P < 0.01$, ***, $P < 0.001$, ns. $P > 0.05$ 。

Note: The treatment combinations are shown in Tab.1; different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

图 1 外源硅对干旱胁迫下烟草叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Effects of exogenous silicon on the antioxidant enzyme activities of tobacco leaves under drought stress

和含水量降低,从而单位质量叶片的比表面积增加^[22]。外源硅处理后,干旱胁迫下烟株的株高、叶片数、单叶面积和比叶面积等指标升高,且都在 2.0 g/kg 硅处理下达到最大值;除叶生物量外,烟草的茎、根、总生物量和根冠比变化不显著,推测可能是硅在植物体内沉积形成角质—双硅层,减少水分通过角质层的蒸腾流失,从而可提高烟株的用水效率,提高其抗旱性^[23],且适宜的硅施用量对地上部生长的促进作用优于对根的影响;而良好水分处理下,外施 1.0 和 1.5 g/kg 硅肥后烟株叶、根及总生物量较对照有所下降,但根冠比增加,而施加 2.0 g/kg 硅肥后各器官生物量达到最大值,表明硅肥具有剂量效应,低含量硅通过提高根冠比增强烟株根系的吸收能力,促进烟株生长,而 2.0 g/kg 硅处理则通过促进根、茎、叶生长使烟株吸收到更多的养分,促进烟株生长发育。

光合色素含量在一定程度上反映了光合作用的水平。干旱胁迫下,植物类囊体解体,叶绿体内部结构的完整性遭到破坏,植物对光量子的吸收与传递减缓,从而降低植物的光能转化效率,抑制光合作用,引起叶片光合色素含量降低^[24]。本研究中,干旱胁迫下,烟叶的光合色素含量降低,这可能是干旱胁迫使烟叶吸收光能和光保护能力减弱,光合作用受到抑制,导致烟叶叶绿素含量减少,这与陈彪等^[25]的研究结论一致。外施硅肥后光合色素含量升高,且在 2.0 g/kg 硅处理下烟叶的光合色素含量能达到正常生长条件下的水平,表明干旱胁迫下外源硅可能参与了细胞器膜的保护,更好地平衡了干旱条件下叶绿素的合成与降解,减轻干旱胁迫对烟株光合器官的损伤,从而增强其光合能力,此结果与前人对草莓^[26]和荞麦^[27]的研究结果一致。

研究表明:干旱胁迫下植物因脱水而受到渗透胁迫,从而破坏细胞的离子分布与动态平衡,膨压降低以及正常代谢失调,而外施硅肥有利于渗透调节物质的积累,缓解干旱胁迫对植物的损伤^[28-29]。本研究中,烟叶的脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量在干旱胁迫下增加;经外源硅处理后,其渗透调节物质含量进一步升高,且在 2.0 g/kg 硅处理下增至最高水平。说明外源硅进入植物体内后,可促进植物的渗透调节能力,提高可溶性物质的积累,从而减轻干旱胁迫对植物

的不利影响,这与龚束芳等^[30]对远东芨芨草的研究结果相似。

研究表明:当植物遭受逆境胁迫时,活性氧与自由基植物细胞代谢受阻而大量产生,使产生与清除的动态平衡被扰乱,破坏植物细胞膜,导致氧化胁迫,进而引起膜脂过氧化产物 MDA 积累,其含量越高则表明植物组织保护能力越弱^[31]。本研究中,烟叶的 MDA 含量在干旱胁迫下显著增加,而经 2.0 g/kg 硅处理后 MDA 含量降至最低水平,说明外源硅处理能减少干旱胁迫引起的细胞膜损伤和膜脂过氧化程度,进而使烟株能够更好地适应干旱环境,这与张杰等^[32]对燕麦的研究结果相似。干旱胁迫下,植物为了保护自身免受活性氧的侵害,会激活抗氧化酶防御系统,使活性氧的产生和去除保持动态平衡,从而缓解干旱引起的氧化应激。前人研究发现:硅肥可以影响植物体内活性氧的积累,维持活性氧代谢平衡和膜系统的稳定性,增强抗氧化酶活性,提高植物的抗逆性^[33]。本研究中,烟叶抗氧化酶活性在干旱胁迫下显著下降,这一结果与王玉珏等^[34]对黄瓜幼苗的研究结果不同,这可能是由于植物种类不同、对水分亏缺的敏感程度不一以及抗旱性程度不同而导致抗氧化酶活性有升有降^[35-36]。外施硅肥后,抗氧化酶活性显著升高,且在 1.5~2.0 g/kg 硅肥处理时恢复到对照水平,说明硅降低了干旱胁迫对植物的氧化受损程度,诱导烟叶抗氧化酶活性提高,清除植物体内多余的自由基,使其在逆境下能正常生长。

4 结论

干旱胁迫下,烟株的株高及生物量显著下降,说明其生长受到干旱抑制;施用 1.0~2.0 g/kg 外源硅可显著缓解生长形态和生物量指标的下降,促进渗透调节物质和光合色素积累,提高抗氧化酶活性,以此增强烟株对干旱胁迫的抵御能力,且以 2.0 g/kg 硅处理效果最明显。本研究说明外源硅可用于烟株的耐旱性生产实践,对提高烟株耐旱性具有一定的指导意义。

[参考文献]

- [1] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737. DOI: 10.1890/1051-0761(1997)007.

- [2] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA R J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616. DOI: 10.1126/science.1204531.
- [3] 刘春成, 李中阳, 胡超, 等. 逆境条件下硅肥调控效应研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 337. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.20194.
- [4] WANG M, WANG R R, MUR L A J, et al. Functions of silicon in plant drought stress responses[J]. *Horticulture Research*, 2021, 8(1): 254. DOI: 10.1038/s41438-021-00681-1.
- [5] MALIK M A, WANI A H, MIR S H, et al. Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 165(8): 187. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.04.021.
- [6] 郑世英, 郑晓彤, 耿建芬, 等. 硅对干旱胁迫下野生大豆幼苗生长和生理特性的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(2): 263. DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2018.02.0263.
- [7] 杨慧颖, 邓雅楠, 许凌欣, 等. 干旱胁迫下硅对肥皂草抗氧化系统及膜质稳定性的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(10): 77. DOI: 10.11686/cyxb2016486.
- [8] 曾瑞儿, 王鑫悦, 侯雪莹, 等. 硅对干旱胁迫下花生幼苗生长和生理特性的影响[J]. *花生学报*, 2018, 47(4): 13. DOI: 10.14001/j.issn.1002-4093.2018.04.003.
- [9] DESOKY E M, MANSOUR E, EL-SOBKY E E A, et al. Physio-biochemical and agronomic responses of faba beans to exogenously applied nano-silicon under drought stress conditions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12(9): 1. DOI: 10.3389/fpls.2021.637783.
- [10] PATEL M, FATNANI D, PARIDA A K. Silicon induced mitigation of drought stress in peanut genotypes (*Arachis hypogaea* L.) through ion homeostasis, modulations of antioxidative defense system, and metabolic regulations[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 166(9): 290. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.06.003.
- [11] 王忠, 宋春燕. 关于对烟草种植技术的研究与探讨[J]. *农业与技术*, 2015, 35(12): 129. DOI: 10.11974/nyyjs.20150633116.
- [12] 曾昭松, 吴才源, 龙立汪, 等. 烤烟品种云烟87生产技术研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2018, 24(9): 38. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2018.09.017.
- [13] 王亚虹, 许自成, 高森, 等. 烟草干旱胁迫研究进展[J]. *节水灌溉*, 2016(12): 103. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2016.12.022.
- [14] 罗丽娟, 唐莉娜, 陈星峰, 等. 硅对镉胁迫下烟草叶片PS II叶绿素荧光特性的影响[J]. *烟草科技*, 2019, 52(8): 1. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2018.0490.
- [15] 张昊. 硅缓解烟草幼苗镉毒害的作用效果及机理[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [16] 梁喜龙, 段立华, 梁鹏飞, 等. 外源硅包衣对干旱胁迫下大豆幼苗生长的调控效应[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2019, 31(2): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2090.2019.02.002.
- [17] 张宪政. 植物叶绿素含量测定: 丙酮乙醇混合液法[J]. *辽宁农业科学*, 1986(3): 26.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 宁朋, 李燕, 张敏, 等. 外源一氧化氮(NO)对干旱胁迫滇润楠幼苗生长及生理特性的影响[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(3): 636. DOI: 10.7540/j.ynu.20210145.
- [21] ETESAMI H, JEONG B R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 147(1): 881. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.063.
- [22] 张智猛, 戴良香, 宋文武, 等. 不同花生基因型对干旱胁迫的适应性[J]. *中国油料作物学报*, 2012, 34(4): 377.
- [23] AGARIE S, HANAOKA N, UENO O, et al. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.) monitored by electrolyte leakage[J]. *Plant Production Science*, 1998, 1(2): 96. DOI: 10.1626/pps.1.96.
- [24] 王玉杰, 申海燕, 何红梅, 等. 干旱胁迫与复水对不结球白菜光合、荧光及表型参数的影响[J]. *上海农业学报*, 2022, 38(3): 19. DOI: 10.15955/j.issn1000-3924.2022.03.04.
- [25] 陈彪, 李继伟, 王小东, 等. 外源硒对干旱胁迫下烤烟生长和生理特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(1): 165. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2017.0427.
- [26] 王耀晶, 马聪, 张薇, 等. 干旱胁迫下硅对草莓生长及生理特性的影响[J]. *核农学报*, 2013, 27(5): 703. DOI: 10.11869/hnxb.2013.05.0703.
- [27] 陈花, 王建军, 王富刚, 等. 外源硅对干旱胁迫下荞麦幼苗水分代谢的影响[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(11): 1393. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2481.2015.11.02.
- [28] 王淑妍, 郭九峰, 刘晓婷, 等. 非生物胁迫下植物表观遗传变异的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(3): 631. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.03.0631.
- [29] 刘铎, 李平, 杨庆山, 等. 硅提高植物耐旱性研究进展[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(2): 88. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2019.02.013.
- [30] 龚束芳, 刘阳, 速馨逸, 等. 纳米硅肥对远东芨芨草幼苗模拟抗旱的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(12): 2924. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0109.
- [31] 刘莹, 李鹏, 沈冰, 等. 采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3055. DOI: 10.5846/stxb201601180112.
- [32] 张杰, 闫志坚, 尹强, 等. 硅对干旱胁迫下燕麦幼苗光合和生理特性的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(4): 50. DOI: 10.16742/j.zgcdxb.20190229.
- [33] 贾国涛, 马一琼, 陈芳泉, 等. 枸橼性硅肥对烤烟生理指标和烟叶品质的影响[J]. *中国烟草科学*, 2016, 37(6): 43. DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2016.06.008.
- [34] 王玉珏, 付秋实, 郑禾, 等. 干旱胁迫对黄瓜幼苗生长、光合生理及气孔特征的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2010, 15(5): 12. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2010.05.003.
- [35] 倪霞, 周本智, 曹永慧, 等. 干旱胁迫对植物光合生理影响研究进展[J]. *江苏林业科技*, 2017, 44(2): 34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7380.2017.02.008.
- [36] 胡胜男, 王波, 李铁华, 等. 叶面喷施亚精胺对干旱胁迫下闽楠幼苗生理的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(6): 31. DOI: 10.11929/j.swfu.202011073.

责任编辑: 何馨成