

低钾胁迫下干旱对烤烟幼苗 生理特性及钾含量的影响

石秋环¹,徐高强²,代晓燕³,张铜津³,陈培钰³

(1.河南省烟草公司洛阳市公司,河南 洛阳 471023;2.福建金闽再造烟叶发展有限公司,福建 福州 350600;

3.河南农业大学烟草学院/烟草行业烟草栽培重点实验室,河南 郑州 450002)

摘要:为探究低钾胁迫下不同干旱程度对烤烟幼苗生理特性及烟株钾含量的影响,以烤烟品种‘K326’为试验材料,采用室内水培法,分别设置不同钾水平(低钾 0.15 mmol·L⁻¹,常钾 5.00 mmol·L⁻¹)和模拟干旱程度(PEG-6000 浓度分别为 0.5%、10%、15%、20%)双因素处理,对烟株生理指标、光合特性及烟株各部位钾含量进行测定。结果表明:相同 PEG-6000 浓度下,低钾水平处理的烟株地上部及根系干质量、鲜质量、根系活力、烟叶光合指标(除胞间 CO₂ 浓度和水汽压饱和和亏外)和各部位钾含量均低于常钾水平,其中低钾水平下烟株地上部及根系钾含量较常钾水平分别降低了 10.62%~21.70%和 35.96%~58.82%。常钾水平下,随着 PEG-6000 浓度的升高,烟株根系干质量、根系活力、叶片净光合速率、气孔导度、水分利用率、叶片可溶性蛋白含量、叶片 POD、CAT 活性均表现为先升高后降低,且均在 PEG-6000 浓度为 10%时达到最大值,与 PEG 0 处理相比,各指标分别增加了 16.01%、131.66%、27.87%、73.68%、78.57%、44.13%、179.11%、49.21%。低钾水平下,添加 PEG 后烟草各部位干质量、鲜质量、烟叶光合特性均明显降低,其中 20% PEG-6000 处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率较 PEG 0 处理分别降低了 56.25%、41.94%、57.14%、36.90%;随 PEG-6000 浓度的升高,烟株叶片的相对电导率、过氧化氢、超氧阴离子和丙二醛含量逐渐升高,分别比 PEG 0 处理增加了 20.45%~108.55%、34.53%~197.61%、67.38%~106.24%、10.98%~69.80%。植株各部位钾含量在不同钾水平下均随 PEG-6000 浓度升高而逐渐降低,当 PEG-6000 浓度为 20%时,常钾水平烟株地上部和根系钾含量较 PEG 0 处理分别降低了 63.44%和 40.66%,低钾水平分别降低了 76.49%和 34.39%。综上所述,低钾水平下,干旱胁迫显著抑制了烤烟的生长发育,而提高钾水平可增强根系活力和光合作用、降低叶片活性氧含量等以缓解干旱胁迫造成的损伤,从而提高烤烟整体抗旱性;但当干旱胁迫严重到一定程度时,钾水平提高无法缓解干旱对烤烟生长造成的不利影响。

关键词:烤烟幼苗;低钾;干旱;抗逆生理;植株钾含量

中图分类号:S572;Q945.78 **文献标志码:**A

Effects of drought on physiological characteristics and potassium content of flue-cured tobacco seedlings under low potassium stress

SHI Qiuhuan¹, XU Gaoqiang², DAI Xiaoyan³, ZHANG Tongjin³, CHEN Peiyu³

(1. Luoyang City Company, Henan Tobacco Company, Luoyang, Henan 471023, China;

2. Fujian Jinmin Reconstructed Tobacco Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350600, China;

3. College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Key Laboratory for Tobacco

Cultivation in Tobacco Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: To investigate the effects of different drought levels on physiological characteristics and potassium uptake of flue-cured tobacco seedlings under low potassium stress, flue-cured tobacco variety K326 was used as the experimental material and the physiological indexes, photosynthetic characteristics and potassium content of each part of the tobacco plant were measured by indoor hydroponics. A two-factor design was used with different potassi-

收稿日期:2022-07-04

修回日期:2022-09-03

基金项目:国家自然科学基金(31501823);中国烟草总公司河南省公司科技项目(202041000270020);河南省烟草公司洛阳市公司科技专项(2021410300270050)

作者简介:石秋环(1973-),女,河南洛阳人,农艺师,主要从事烟叶生产与经营管理研究。E-mail: 358207289@qq.com

通信作者:代晓燕(1979-),女,河南许昌人,博士,副教授,主要从事烟草栽培生理与营养研究。E-mail: daixiaoy319@163.com

um levels (low potassium $0.15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and normal potassium $5.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) and simulated drought degree with PEG-6000 (concentration 0, 5%, 10%, 15%, 20%, respectively). The results showed that at the lower potassium level, the dry and fresh weight of above-ground part and root of tobacco seedlings, root activity, photosynthetic indexes of leaf (except intercellular CO_2 concentration and water vapor pressure saturation deficit) and potassium content in all parts of tobacco plants were lower than that at the normal potassium level under the same PEG-6000 concentration. The potassium content in above-ground part and root of tobacco plant under low potassium stress decreased by 10.62%~21.70% and 35.96%~58.82% compared with normal potassium level, respectively. At normal potassium level, with the increase of PEG-6000 concentration, root dry weight, root activity, leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, water utilization, leaf soluble protein content, POD and CAT activities of tobacco plant first increased and then decreased. And all of these indexes achieved the maximum value when PEG-6000 concentration was 10%. Compared with PEG-6000 concentration 0 treatment, the increases were 16.01%, 131.66%, 27.87%, 73.68%, 78.57%, 44.13%, 179.11% and 49.21%, respectively. Under low potassium stress, the dry and fresh weight of all parts of tobacco and photosynthetic characteristics of tobacco leaves were significantly reduced after the addition of PEG, in which the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and water utilization were reduced by 56.25%, 41.94%, 57.14% and 36.90% in the PEG-6000 concentration 20% treatment compared with 0 PEG concentration. The relative conductivity, hydrogen peroxide, superoxide anion and malondialdehyde contents in tobacco leave gradually increased with the increase of PEG-6000 concentration. Compared with PEG concentration 0 treatment, and they increased by 20.45%~108.55%, 34.53%~197.61%, 67.38%~106.24%, 10.98%~69.80% respectively. Under the two potassium levels, the potassium content in all parts of the plant gradually decreased with the increase of PEG-6000 concentration. When the PEG-6000 concentration was 20%, the potassium content in aboveground part and root of tobacco plants at normal level decreased by 63.44% and 40.66% compared with the treatment of PEG concentration 0, while that decreased by 76.49% and 34.39% at low potassium level. In summary, drought stress significantly inhibited the growth and development of flue-cured tobacco at low potassium level, while increasing potassium levels alleviated the damage caused by drought stress by enhancing root activity and photosynthesis and reducing leaf reactive oxygen content to improve the overall drought resistance of flue-cured tobacco. However, when drought stress was severe to a certain extent, potassium level was not able to alleviate the adverse effects of drought on growth and physiology of flue-cured tobacco.

Keywords: flue-cured tobacco seedlings; low potassium; drought; stress resistance physiology; plant potassium content

钾作为必需营养元素和品质元素^[1-2],参与了植物生长发育和光合作用等重要生理活动^[3-4],低钾胁迫会显著影响烟草幼苗的生长发育、钾吸收及烟株生长后期产量和质量的形成^[5]。全球气候变化增加了非生物胁迫的风险,其中干旱是限制作物产量的重要环境因素,会造成烤烟生理和生化上的变化,影响其增产潜力^[6]。干旱胁迫可通过影响离子吸收和酶活性影响烤烟生长,过度干旱还会降低土壤水势,导致根部吸水受阻,抑制烟株对钾的吸收^[7]。我国黄淮、西南等主要烟草种植区的烟草幼苗常遭受干旱胁迫的影响^[8],而钾具有增强植物气孔运动^[9]、调节蒸腾作用^[10]、提高作物渗透调节能力^[11]、减少干旱下活性氧积累^[12]、提高植物吸水 and 保水能力^[13]等作用,能够有效提高干旱胁迫下烟草

幼苗的存活率。

钾含量是国际上考量烟叶质量的一项重要指标,钾含量高的烟叶具有色泽桔黄、香气量足、吃味好、填充性强等优点^[14]。美国和田津巴布韦的烟叶钾含量多介于4%~6%^[15],但我国的烟叶钾含量偏低,仅为1%~2%^[16]。河南烟区作为黄淮烟区的重要组成部分,每年产烟叶大于1亿kg,烟草产业对河南经济发展有至关重要的作用^[17]。但近年来由于干旱频发、土壤供钾能力不足及钾肥利用率低等问题困扰,该烟区烟草生产面临干旱和钾营养不足的双重胁迫,烟叶钾含量仅为1.5%左右,烟草品质下降^[17-18],严重制约了河南烟区烤烟生产的优质化和高效化。如何提高干旱胁迫下烟株钾含量成为目前亟待解决的问题。基于此,本试验采用室内水

培法,研究低钾胁迫下不同干旱程度对烟草幼苗生理特性及钾吸收的影响,探讨低钾胁迫下不同干旱程度与植株耐低钾能力和发挥生理功能的关系,以期为烤烟抗逆提钾栽培提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料及其培养

试验于 2021 年在河南农业大学烟草行业烟草栽培重点实验室进行,以烟草品种‘K326’(*Nicotiana tabacum* ‘K326’)为试验材料。培育方法:用 10%的 H_2O_2 浸泡烟草种子 15 min 后使用蒸馏水清洗,再将种子置于蒸馏水中浸泡 8 h,点种于育种海绵上,出苗后选择大小一致的烟苗移栽至装有珍珠岩的小黑盆中,每日补充 Hoagland 全营养液,并置于人工气候箱(RXZ 型,宁波江南仪器厂)中培养。人工气候箱参数设置如下:白天温度(28 ± 2) $^{\circ}C$,夜间温度(18 ± 2) $^{\circ}C$,光照强度 4 000 lx,光周期 14 h,相对湿度 65%~70%。

1.2 试验处理

当烟苗长至 3 片真叶时,选择长势均匀的烟苗,分别置于不同钾水平和 PEG-6000(聚乙二醇 6000,天津市科密欧化学试剂有限公司)浓度的 Hoagland 全营养液中处理 8 d。试验为双因素试验,分别设低钾($0.15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,LK)和常钾($5.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,CK) 2 个钾水平^[19],0、5%、10%、15%、20%共 5 个 PEG-6000 浓度,以 Hoagland 全营养液配制。培养期间使用充气泵每日通气 8 h,处理 8 d 后取样测定相关指标,pH 调节至 6.5~7.0,每处理 15 个生物学重复。

1.3 测试指标和方法

1.3.1 地上部及根系干、鲜质量测定 分别取烟株地上部及根系称量鲜质量,置于烘箱 105 $^{\circ}C$ 杀青 15 min 后,65 $^{\circ}C$ 烘干至恒重,分别测定干质量。

1.3.2 烟株胁迫相关的生理指标测定

(1)叶片可溶性蛋白含量:取烟株自上而下第 2、3 叶位叶片(整片,下同),采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定叶片中的可溶性蛋白含量^[20]。

(2)根系活力:取烤烟根尖部位 0.5 g 样品,采用 TTC(氯化三苯基四氮唑)法测定根系活力^[21]。

(3)细胞电导率:取叶片鲜样 6 份,各 0.1 g,放进 50 mL 离心管,加入 10 mL 蒸馏水后室温下浸泡 12 h,采用电导率仪(DDS-307 型,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定提取液电导率 R_1 ,沸水浴加热 30 min,冷却摇匀后测定提取液电导率 R_2 ,相对电导率= $R_1/R_2\times 100\%$ ^[22]。

(4)叶片活性氧积累量:利用 H_2O_2 与硫酸钛生成黄色的过氧化钛复合物在 415 nm 有特征吸收的原理测定植株叶片中 H_2O_2 含量,根据试剂盒(南京建成生物工程研究所)使用步骤检测;同理测定超氧阴离子含量。

(5)叶片丙二醛含量:采用 TBA(硫代巴比妥酸)法测定丙二醛(MDA)含量^[21]。

(6)叶片抗氧化酶活性:采用核黄素-NBT 法测定烟叶超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[22]。

1.3.3 烟株光合指标测定 每处理选 6 株长势均匀一致的烟株,于 9:00—11:00 用光合仪(CIRAS-3,英国汉莎科学仪器公司)测定烟株第 3 片真叶的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、水汽压饱和亏、水分利用率等光合参数,测定环境条件严格控制,其中光强(PAR)设定为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 摩尔分数为 $390\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,温度为 25 $^{\circ}C$ 。

1.3.4 烟株各部位钾含量测定 将 1.3.1 中所述烘干样品研磨粉碎并过 0.2 mm 筛后,精确称量 0.1000 g,采用 $1\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸浸提^[23]后,使用火焰光度计(FP 640,上海奥析科学仪器有限公司)分别测定烟株地上部和根系中的钾含量。

1.4 数据处理

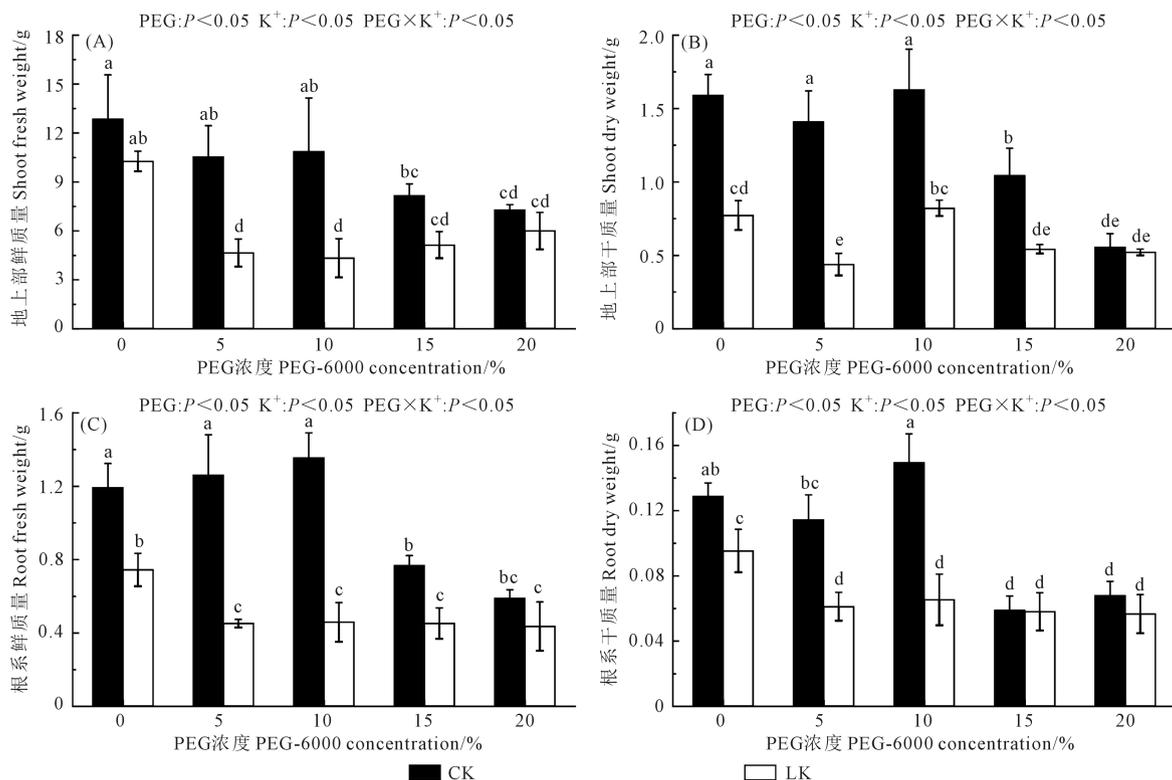
采用 Excel 2016 进行数据整理,利用 Origin 2019b 作图,采用 DPS(v 7.05)对数据进行统计分析,Duncan 新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 钾水平和 PEG 胁迫对烟株生长发育及胁迫相关生理特性的影响

2.1.1 烟株地上部及根系的干、鲜质量 由图 1 可知,PEG 浓度、供钾水平和两者互作对烟株地上部和根系干、鲜质量影响均显著($P<0.05$)。相同 PEG-6000 浓度下,常钾水平(CK)烟株的地上部及根系干、鲜质量整体上高于低钾水平(LK)。常钾水平下,随着干旱程度的加剧,烟株干、鲜质量整体表现为先增加后降低的趋势(地上部鲜质量除外),均在 PEG-6000 为 10%时达到最大值。低钾水平下添加 PEG-6000 后,烟株地上部鲜质量和根系干、鲜质量均显著下降,而地上部干质量则在 PEG-6000 浓度为 10%时相对较高。

2.1.2 烟株胁迫相关的生理特性 由图 2 可知,PEG 浓度及供钾水平对烟株叶片可溶性蛋白含量、



注:不同小写字母表示处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著;PEG、 K^+ 和 PEG $\times K^+$ 分别表示 PEG 浓度、供钾水平和 PEG 浓度 \times 供钾水平(二者交互作用), $P < 0.05$ 表示该因素对指标影响显著, $P > 0.05$ 表示影响不显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level; PEG, K^+ and PEG $\times K^+$ indicate PEG concentration, potassium supply level and PEG concentration \times potassium supply level, respectively, except that $P < 0.05$ indicates that the factor has a significant effect on the index and $P > 0.05$ indicates that it is not significant. The same below.

图1 钾和 PEG 处理对烟株地上部及根系的干、鲜质量影响

Fig.1 Effects of potassium and PEG treatments on the dry and fresh mass of tobacco shoots and roots

根系活力、相对电导率和抗氧化酶活性的影响显著,而两者交互作用影响不显著。如图 2A 所示,除 20% PEG-6000 外,低钾水平下各 PEG-6000 浓度处理的烟叶可溶性蛋白含量显著高于常钾水平;随着干旱程度的加剧,2 个钾水平下的叶片可溶性蛋白含量均呈现先增加后降低的趋势,且均在 PEG-6000 浓度为 10% 时达到最大值。由图 2B 可知,低钾水平根系活力低于常钾水平,且 0、10%、15% PEG-6000 浓度下两者差异均达显著水平;两种钾水平下,根系活力均随 PEG-6000 浓度的增加表现为先增加后降低,且均在 PEG-6000 浓度为 10% 时达最大值。

如图 2C 所示,低钾水平下烟株叶片的相对电导率均高于常钾水平,且两者差异达到显著水平(15% PEG-6000 处理除外)。两种钾水平下,随着 PEG-6000 浓度的增加(即干旱程度的加剧),叶片的相对电导率逐渐上升,且均在 PEG-6000 浓度为 20% 处达到最大值。低钾水平下,随 PEG-6000 浓度的上升,叶片的相对电导率分别显著增加了 20.45%、39.24%、24.66% 和 108.55%。

如图 2D、2E、2F 可知,在相同 PEG-6000 浓度处理下,低钾水平的叶片抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性均高于常钾水平。在相同钾水平下,随着 PEG-6000 浓度的上升,3 种抗氧化酶活性整体均呈先增加后降低的趋势。低钾水平下,SOD 活性在 PEG-6000 浓度为 10% 时最大,较 PEG 浓度 0、15%、20% 处理分别显著增加 35.17%、14.97% 和 17.28% (图 2D)。

低钾水平下,添加 PEG-6000 处理的 POD 活性与 PEG 0 处理相比差异均达到显著水平,其中,以 PEG-6000 浓度为 5% 和 10% 的增幅最大,分别为 137.89% 和 120.26% (图 2E)。CAT 活性与 SOD 活性的变化规律类似,两种钾水平下均在 PEG-6000 浓度为 10% 处达到最大值,且 PEG-6000 浓度 10% 处理的 CAT 活性显著高于其他处理(PEG-6000 浓度为 5% 除外) (图 2F)。

2.1.3 烤烟叶片活性氧含量 如图 3 所示,PEG 浓度、供钾水平及二者交互作用对烟株叶片活性氧含量影响显著。相同 PEG-6000 浓度下,低钾水平活性氧含量较常钾水平显著提高。常钾水平下,PEG-6000 浓度 5%、10%、15% 和 20% 处理的叶片过氧化

氢含量较 PEG 0 处理分别显著增加了 78.78%、153.60%、164.21% 和 208.48%；低钾水平下分别显著增加了 34.53%、85.61%、128.85% 和 297.61% (图 3A)。超氧阴离子的变化趋势与过氧化氢相似,即在相同钾水平下,PEG-6000 处理后烟叶超氧阴离

子含量均显著增加。常钾水平下,随 PEG 浓度增加,PEG-6000 处理的烟叶超氧阴离子含量较 PEG 0 处理分别增加了 96.70%、169.73%、188.12% 和 312.26%；低钾水平下分别显著增加了 67.38%、90.56%、154.55% 和 206.24%。

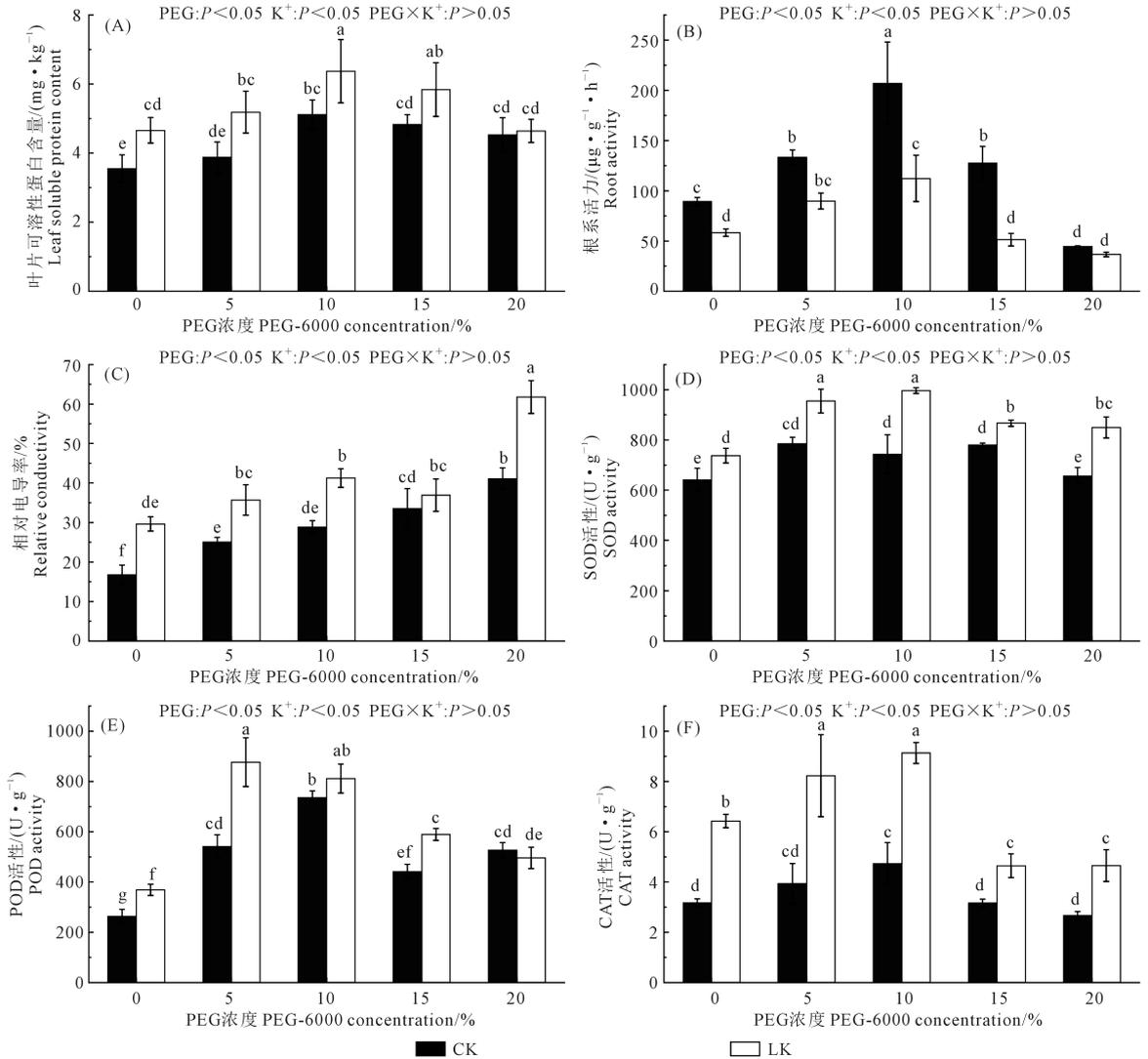


图 2 钾和 PEG 处理对烟株胁迫相关生理指标的影响

Fig.2 Effects of potassium and PEG treatments on physiological indicators related to stress in tobacco plants

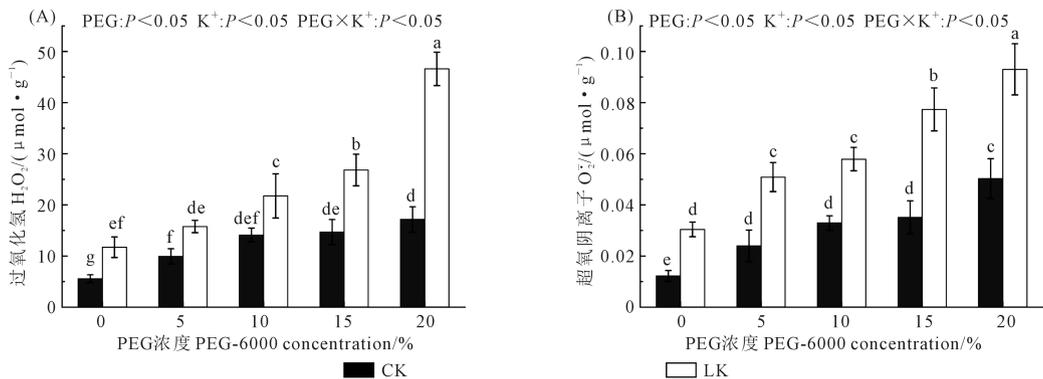


图 3 钾和 PEG 处理对烤烟叶片活性氧含量的影响

Fig.3 Effects of potassium and PEG treatments on active oxygen content in flue-cured tobacco leaves

2.1.4 烤烟叶片丙二醛含量 如图4所示,PEG浓度和供钾水平对烟株叶片丙二醛含量影响显著。叶片丙二醛含量在低钾水平下显著高于常钾水平。

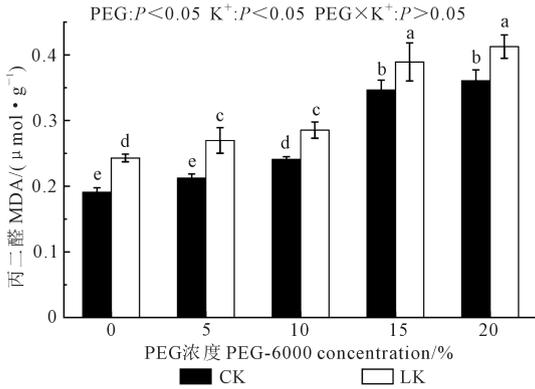


图4 钾和PEG处理对烤烟叶片丙二醛含量的影响

Fig.4 Effects of potassium and PEG treatments on malondialdehyde content in flue-cured tobacco leaves

无论何种钾水平下,随着PEG-6000浓度的增加,烟株叶片丙二醛含量均呈现逐渐升高的趋势,其中常钾水平下,10%、15%、20%PEG-6000处理与PEG 0处理相比分别显著增加了26.34%、81.52%和88.77%;低钾水平下,随着PEG-6000浓度的增加,各PEG处理与PEG 0处理相比依次增加了10.98%、17.48%、60.20%和69.80%。

2.2 钾水平和PEG胁迫对烤烟叶片光合特性的影响

如图5所示,PEG浓度、供钾水平和PEG浓度×供钾水平对烟株各光合特性指标的影响显著。相同PEG-6000浓度下,常钾水平幼苗叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率整体高于低钾水平,而叶片的胞间CO₂浓度(PEG 0处理除外)和水汽压饱和亏则低于低钾水平。常钾水平下,除胞间CO₂浓度和水汽压饱和亏外,其余光合特性指标均随着干旱程度的加剧呈先增加后降低趋势,且

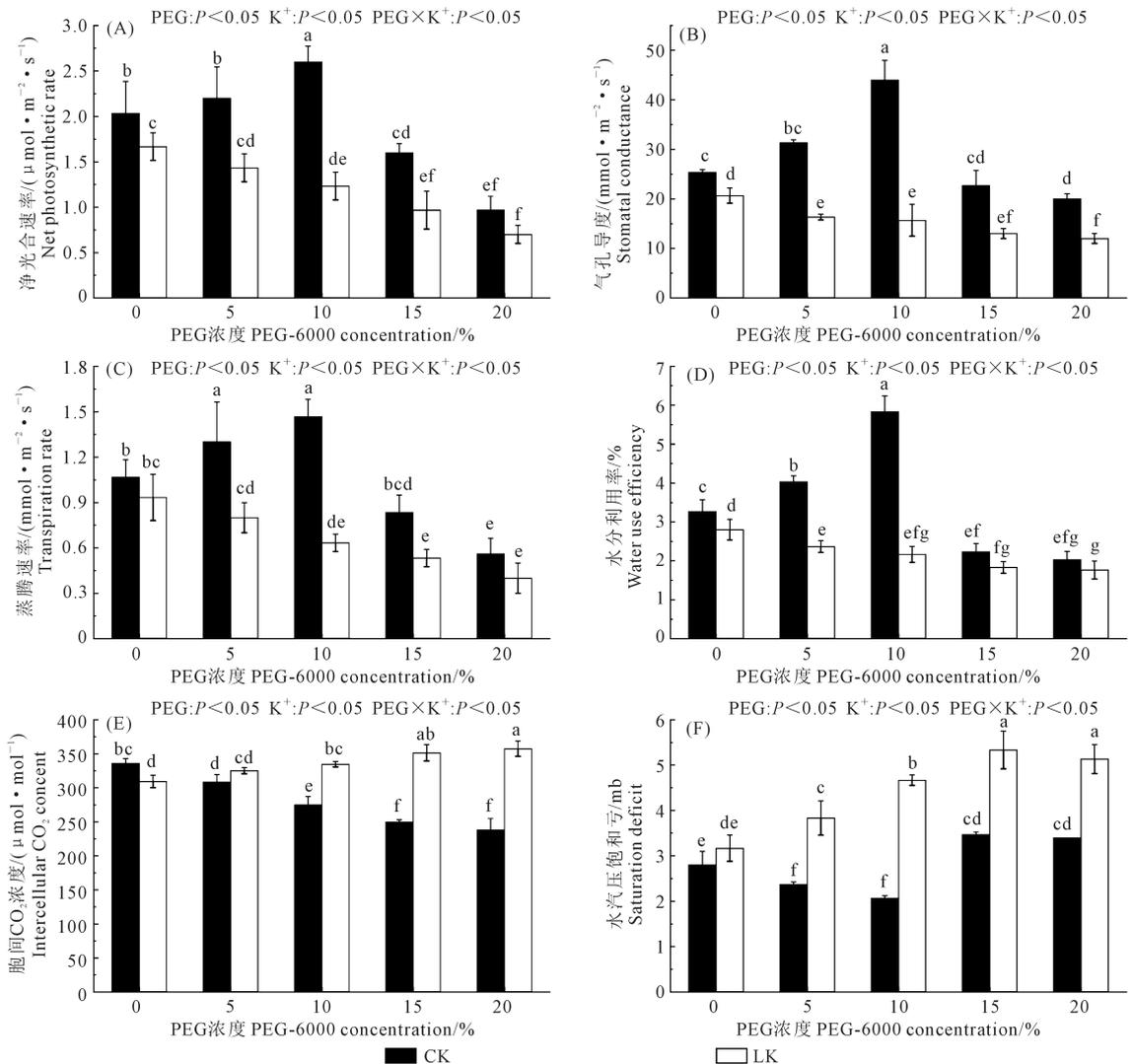


图5 钾和PEG处理对烟叶光合特性的影响

Fig.5 Effects of potassium and PEG treatments on photosynthetic characteristics of tobacco leaves

在 PEG-6000 浓度为 10% 时达到最大值, 与 PEG 0 相比, 净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率分别增加了 27.87% (图 5A)、73.68% (图 5B)、37.50% (图 5C)、78.57% (图 5D)。低钾水平下, 随着 PEG-6000 浓度的增加, 光合特性指标(胞间 CO_2 浓度和水汽压饱和亏除外)均呈逐渐降低的趋势, 且均与 PEG 0 间差异显著(5% PEG-6000 处理的净光合速率和蒸腾速率除外), 其中各 PEG-6000 处理的净光合速率较 PEG 0 处理分别降低 14.00%、26.00%、42.00% 和 58.00%, 气孔导度分别显著降低 20.97%、24.19%、37.10% 和 41.94%, 蒸腾速率分别降低 14.29%、32.14%、42.86%、57.14%, 水分利用率分别显著降低 15.48%、22.62%、34.52%、36.90%。

常钾水平下, 随着干旱程度的加重, 叶片的胞间 CO_2 浓度呈现逐渐降低的趋势, 且与 PEG 0 差异达到显著水平; 低钾水平下规律则相反, 即随着 PEG-6000 浓度的增加, 叶片胞间 CO_2 浓度逐渐增加, 且除 5% PEG-6000 浓度外, 其余浓度处理均显著高于 PEG 0 (图 5E)。常钾水平下, 随着 PEG-

6000 浓度的增加, 叶片的水汽压饱和亏表现为先降低后升高的趋势, 在 PEG-6000 浓度为 10% 时达到最低值; 低钾水平下叶片的水汽压饱和亏则随着干旱程度的加剧呈现逐渐上升的趋势, 与 PEG 0 处理相比分别显著增加了 21.05%、47.37%、68.42%、62.11% (图 5F)。

2.3 钾水平和 PEG 胁迫对烟株钾素含量的影响

由表 1 可知, 钾水平和 PEG-6000 浓度以及两者交互作用 3 个因素均显著影响植株地上部和根系钾含量, 其中 PEG-6000 浓度对地上部和根系钾含量的贡献率均为最大, 分别为 75.35% 和 64.90%; 其次是钾水平, 贡献率分别达到 21.06% 和 34.17%; 两者交互作用对钾含量的贡献率最低。

如图 6 所示, 在相同 PEG-6000 浓度下, 常钾水平地上部和根系钾素含量均高于低钾水平。常钾水平下, 随着 PEG-6000 浓度的增加, PEG 处理地上部钾含量较 PEG 0 依次显著降低了 25.00%、28.85%、32.97% 和 40.66%; 根系钾含量依次显著降低了 39.67%、45.52%、53.76% 和 63.44%。低钾水平下,

表 1 钾和 PEG 处理对烟株地上部和根系钾含量影响的方差分析

Table 1 Variance analysis on the effects of potassium and PEG treatments on potassium content in the shoot and root parts of tobacco plants

部位 Position	变异来源 Variation source	df	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F value	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	贡献率/% Contribution rate
地上部 Shoot	钾水平 Level(K)	1	1672.5330	1672.5330	88.388	4.41	8.29	21.06
	PEG 浓度 PEG concentration(P)	4	5985.2000	1496.3000	79.030	2.93	4.58	75.35
	K×P	4	285.4667	71.3667	3.769	2.93	4.58	3.59
	误差 Error	20	378.6667	18.9333				
	总变异 Total	29	8321.8670					
根系 Root	钾水平 Level(K)	1	468.8653	468.8653	803.303	4.41	8.29	34.17
	PEG 浓度 PEG concentration(P)	4	890.6313	222.6578	381.478	2.93	4.58	64.90
	K×P	4	12.7647	3.1912	5.467	2.93	4.58	0.93
	误差 Error	20	11.6734	0.5837				
	总变异 Total	29	1383.9350					

注: 贡献率 (%) = $SS_{\text{变异}} \times 100\% / (SS_{\text{总}} - SS_{\text{误差}})$ 。

Note: Contribution rate (%) = $SS_{\text{Variant}} \times 100\% / (SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Error}})$ 。

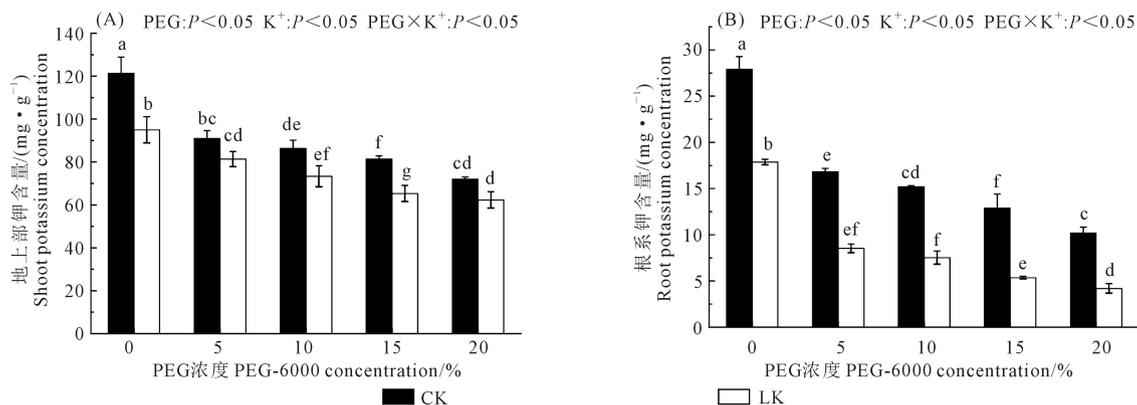


图 6 钾和 PEG 处理对烟株地上部及根系钾含量的影响

Fig. 6 Effects of potassium and PEG treatments on potassium content in tobacco shoots and roots

随 PEG-6000 浓度的增加,地上部钾含量与 PEG 0 相比分别显著降低了 14.39%、22.81%、31.23%和34.39% (图 6A);根系钾含量分别显著降低了 52.24%、57.84%、69.96%和 76.49% (图 6B)。各 PEG-6000 浓度处理低钾条件地上部钾含量较 PEG 0 处理降低幅度均小于常钾水平,根系钾含量则相反。

3 讨论

本研究表明,低钾胁迫下,不同干旱程度对烟株生长发育有不同影响。在常钾水平下,随着 PEG-6000 浓度的增加,烟株地上部及根系干、鲜质量整体上呈先升高后降低的趋势;相较于常钾水平,低钾水平下烟株地上部及根系干、鲜质量均有明显降低,这与曹芳等^[24]研究结果一致。本研究还表明,常钾水平下,PEG-6000 浓度 10%最利于烟株各部位干物质积累,这说明适当的干旱条件可对烟苗起到逆境锻炼的作用。根系活力和可溶性蛋白含量与植物代谢状况密切相关^[25-26]。本研究中常规钾和低钾水平下,烟株叶片可溶性蛋白含量、根系活力均随干旱程度的加剧呈先上升后下降的趋势,说明烟株可通过提高可溶性蛋白含量以增强细胞持水力^[27]和提高根系活力以增强根系吸水能力两种方式响应轻度干旱,而重度干旱下植物分解代谢大于合成作用^[28],且根系伸长受到严重抑制^[29],会导致可溶性蛋白含量和根系活力下降。此外,本研究发现,随外界干旱程度的加剧,叶片抗氧化酶活性均表现先升高后降低的趋势,而活性氧含量和丙二醛含量却表现为逐渐升高,说明在一定的胁迫范围内,烟株可通过提高自身的抗逆水平来应对干旱胁迫,当干旱程度进一步加剧时,植株的生长发育则会受到严重抑制,甚至死亡。

烟草为喜光作物,光合作用对其产量和品质的形成有重要影响^[30]。钾素水平与植物叶片的叶绿素含量密切相关,较高的 K^+ 浓度有利于维持叶绿体的光合作用^[31]。本研究表明,常钾水平下,植株叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率均随着干旱胁迫程度的增加呈先升高后降低的趋势,而低钾胁迫下则表现为逐渐降低,说明植物叶片光合作用在受到低钾和干旱双重胁迫时会有一定程度的降低,这可能是气孔和非气孔因素的共同影响造成的^[32]。钾能够参与渗透调节、促进植物气孔运动,进而提高植株的干旱响应能力^[33]。本研究发现,常钾水平植株地上部及根系钾素含量显著高于低钾处理,说明较高浓度的钾水平可提高植株的耐旱性。两种钾水平下,随着 PEG-6000 浓度的增加,

烟株地上部及根系的钾素含量明显降低;但低钾水平地上部钾含量降幅小于常钾水平,根部钾含量降幅则相反。可能是因为低钾和干旱双重胁迫下,烟株地上部可通过维持钾含量来响应胁迫,故钾含量降低幅度相对较小;而根系细胞受损严重,根系吸收养分能力大幅减弱,从而导致钾含量降低幅度更大^[34]。双因素方差分析表明,干旱对幼苗期烟株吸钾能力影响最大,其对地上部和根系钾含量的贡献率分别达到了 75.35%和64.90%;其次是外界钾水平,贡献率分别达到了21.06%和 34.17%;而二者交互作用的影响最小,可能原因是烟草幼苗期生长需钾量较少^[35],且烟草一般在苗期和大田前期较其他生育时期对干旱胁迫更为敏感^[36],加之 PEG 浓度的增加对钾含量产生抑制作用,钾水平的提高对植株钾含量的增加起到促进作用,二者相互拮抗,这也可能是导致干旱对烟株钾含量贡献率大、钾水平和 PEG-6000 浓度二者交互作用对钾含量贡献率低的主要原因。结合生理特性指标,本研究认为常钾水平下,适度的干旱胁迫可促进烟株生长发育及光合作用,但烟株地上部及根部钾含量明显降低,这种降低可能是因为烟株的长势增强造成钾含量“稀释”导致的。低钾水平下,干旱胁迫会抑制烟株生长发育、光合作用及钾素营养的吸收,说明干旱会加重低钾胁迫的效果,这在一定程度上与植株能通过钾饥饿促进自身对水分的吸收和钾有利于提高植物耐旱性的结论一致^[37],但干旱胁迫影响低钾条件下植株生长发育及钾吸收的分子机理有待进一步研究。

4 结论

烟草幼苗期干旱、低钾及其复合胁迫会造成烟草干、鲜质量降低,根系活力减弱,净光合速率、气孔导度等光合性能下降,可溶性蛋白含量、相对电导率等膜透性指标增大,SOD、CAT 等抗氧化酶活性增强,抑制烟株正常生理功能,导致地上部和根系钾含量显著下降。其中,常钾水平下 10% PEG-6000 浓度胁迫对烟草生理功能的影响最小,低钾水平和 20% PEG-6000 浓度复合胁迫的影响大于低钾和干旱单一胁迫。

参考文献:

- [1] 闫慧峰,石屹,李乃会,等.烟草钾素营养研究进展[J].中国农业科技导报,2013,15(1):123-129.
YAN H F, SHI Y, LI N H, et al. Progress in tobacco potassium nutrition[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(1): 123-129.
- [2] 王英锋,徐高强,代卓毅,等.低钾胁迫下不同钙浓度对烟草钾吸收的影响[J].中国烟草科学,2021,42(2):15-21.

- WANG Y F, XU G Q, DAI Z Y, et al. Effects of different calcium concentrations on tobacco potassium uptake under low potassium conditions[J]. Chinese Tobacco Science, 2021, 42(2): 15-21.
- [3] SCHACHTMAN D P, SHIN R. Nutrient sensing and signaling: NPKS[J]. Annual Review of Plant Biology, 2007, 58: 47-69.
- [4] 孔贵祥. 富力邦硅钙钾镁肥[J]. 农业知识, 2015,(31): 36-37.
KONG G X. Fulibang silicon calcium potassium magnesium fertilizer[J]. Agriculture Knowledge, 2015,(31): 36-37.
- [5] 代晓燕, 徐高强, 石秋环, 等. 钙信号抑制剂加剧低钾胁迫对烟草幼苗光合特性及钾吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(1): 138-149.
DAI X Y, XU G Q, SHI Q H, et al. Calcium signal inhibitors exaggerate the impact of low potassium stress on photosynthetic efficiency and potassium uptake of tobacco seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(1): 138-149.
- [6] 周建云, 覃青青, 刁朝强, 等. 不同木醋液对干旱胁迫烤烟生长及生理的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2232-2236.
ZHOU J Y, QIN Q Q, DIAO C Q, et al. Effects of different wood vinegar on growth and physiology of flue-cured tobacco under drought stress[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(10): 2232-2236.
- [7] 霍光, 文涛, 吴珊, 等. 提高烤烟叶片钾含量途径的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2020,(2): 112-114.
HUO G, WEN T, WU S, et al. Research progress on the way to increase potassium content in flue-cured tobacco leaves[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020,(2): 112-114.
- [8] 刘国顺, 陈江华. 中国烤烟灌溉学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 4-12.
LIU G S, CHEN J H. China tobacco irrigation science[M]. Beijing: Science Press, 2012: 4-12.
- [9] PERVEZ H, ASHRAF M, MAKHDUM M I. Influence of potassium nutrition on gas exchange characteristics and water relations in cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Photosynthetica, 2004, 42(2): 251-255.
- [10] BENLLOCH-GONZÁLEZ M, ROMERA J, CRISTESCU S, et al. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure via ethylene synthesis in sunflower plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(4): 1139-1145.
- [11] 赵永长, 宋文静, 邱春丽, 等. 黄腐酸钾对渗透胁迫下烤烟幼苗生长和光合荧光特性的影响[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(4): 98-106.
ZHAO Y C, SONG W J, QIU C L, et al. Effects of fulvic acid potassium on growth and photosynthetic fluorescence characteristics of flue-cured tobacco seedlings under osmotic stress[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(4): 98-106.
- [12] 钟秋生, 林郑和, 陈常颂, 等. 不同浓度钾对茶树幼苗生长及叶片活性氧代谢酶类的影响[J]. 茶叶学报, 2018, 59(1): 12-18.
ZHONG Q S, LIN Z H, CHEN C S, et al. Effects of varied potassium supply on growth and antioxidant enzyme activities in leaves of tea seedlings[J]. Acta Tea Sinica, 2018, 59(1): 12-18.
- [13] 宋文静, 赵永长, 况帅, 等. 干旱胁迫下黄腐酸钾对烤烟幼苗保水渗透调节能力的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(6): 61-66.
SONG W J, ZHAO Y C, KUANG S, et al. Effect of fulvic acid potassium on osmotic adjustment ability of flue-cured tobacco seedlings under drought stress[J]. Chinese Tobacco Science, 2017, 38(6): 61-66.
- [14] 陈剑秋, 万连步, 解玉洪, 等. 包膜控释肥对烤烟烟叶钾含量的影响[J]. 中国烟草学报, 2008, 14(3): 40-45.
CHEN J Q, WAN L B, XIE Y H, et al. Effects of coated controlled-release fertilizers on potassium content in tobacco leaves[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2008, 14(3): 40-45.
- [15] 代晓燕, 郭春燕, 王海波, 等. 钾肥施用方式对豫西烤烟钾含量及产质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(3): 42-49.
DAI X Y, GUO C Y, WANG H B, et al. Effects of potassium fertilization modes on potassium content, yields and quality of flue-cured tobacco leaves in western Henan Province[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(3): 42-49.
- [16] 刘国顺, 王景, 徐辰生, 等. 生物钾肥对烤烟含钾量和经济性状的影响[J]. 中国烟草科学, 2005, 26(4): 46-48.
LIU G S, WANG J, XU C S, et al. Effects of biotic potassium application on potassium content and economic characters of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2005, 26(4): 46-48.
- [17] 李亮, 张翔, 王亚宁, 等. 不同栽培方式与追钾时间对烤烟光合特性、钾含量及产质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018,(4): 67-74, 113.
LI L, ZHANG X, WANG Y N, et al. Effects of different cultivation methods and potassium topdressing time on photosynthetic characteristics, potassium content, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018,(4): 67-74, 113.
- [18] 李强, 周冀衡, 何伟, 等. 中国烤烟含钾量的区域特征研究[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(2): 363-368.
LI Q, ZHOU J H, HE W, et al. Regional characteristics of potassium content in flue-cured tobacco of China[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2010, 37(2): 363-368.
- [19] 杨铁钊, 夏巍, 范进华. 不同供钾水平下烟草钾积累特性研究[J]. 河南科学, 2005, 23(3): 375-378.
YANG T Z, XIA W, FAN J H. Study on characteristic of potassium accumulation of tobacco in potassium levels[J]. Henan Science, 2005, 23(3): 375-378.
- [20] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 68-75.
ZOU Q. Guidance for plant physiology experiments[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 68-75.
- [21] 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: 62, 173.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 62, 173.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 211-217.
GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 211-217.
- [23] 慕文耀. 用盐酸提取火焰光度法测定烟叶中的钾[J]. 烟草科技, 1999,(2): 28-29.
MU W Y. Determination of potassium in tobacco leaves by flame photometry with hydrochloric acid extraction[J]. Tobacco Science & Technology, 1999,(2): 28-29.
- [24] 曹芳, 赵泽茹, 魏永胜. 钾水互作对烟草光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 138-142.
CAO F, ZHAO Z R, WEI Y S. Interactive effect of water and potassium on photosynthesis of tobacco[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 138-142.
- [25] 侯明, 王秀丽, 杨心瀚, 等. 外源钒胁迫下甜玉米植物可溶性蛋白含量的动态变化[J]. 环境化学, 2018, 37(6): 1217-1222.
HOU M, WANG X L, YANG X H, et al. Dynamic changes of soluble protein contents in the sweet corn under exogenous vanadium stress[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(6): 1217-1222.