

盐胁迫对嫁接西瓜幼苗生长及碳、氮、磷、钾化学计量特征的影响

孙小妹¹, 陈思瑾², 杨柳燕², 李金霞¹, 周 彬¹, 陈年来¹

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探究抗枯萎病嫁接西瓜的盐适应性, 获得抗枯萎病的耐盐组合, 本研究基于 1 个自根苗京欣二号和 2 个嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]、[(Bj-9×341)+京欣二号], 分析盐分胁迫对西瓜幼苗期叶片 C、N、P、K 含量及其元素计量比特征、光合特性和生物量累积的影响。结果表明: 自根苗的根冠比、净光合速率和 C : N 显著低于嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号](9.6%、44.2%和 15.5%)和[(Bj-9×341)+京欣二号](21.1%、30.1%和 23.0%), 而嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]的单株生物量、净光合速率、K 含量和 C : P 分别比嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]显著低 9.7%、20.2%、70.3%和 24.9%。与对照相比, 盐胁迫分别使自根苗京欣二号和 2 个嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]、[(Bj-9×341)+京欣二号]的净光合速率显著下降 60.3%、45.8%和 41.9%, 其 C : K 显著下降 48.2%、35.2%和 59.4%, 使叶片 K 含量显著增加 44.8%、27.8%和 56.8%; 嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]、[(Bj-9×341)+京欣二号]的水分利用效率(WUE)在盐胁迫下显著提高 33.5%和 14.3%; 盐分胁迫仅使嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]的 C : N 和 C : P 分别显著提高 18.7%和 15.5%, 而对嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]影响不显著。基于以上结果和 RDA 分析表明自根苗京欣二号可能主要通过调节叶片 K 含量来缓解盐分胁迫, 嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]和[(Bj-6×893)+京欣二号]可能通过提高叶片 K 含量和 WUE 来增强耐盐性, 且嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的耐盐性强于[(Bj-9×341)+京欣二号]。

关键词: NaCl 胁迫; 嫁接西瓜幼苗; 碳、氮、磷、钾化学计量比特征; 盐适应性

中图分类号: S651; Q945 **文献标志码:** A

Effects of salt stress on plant growth and stoichiometric characteristics of C, N, P and K of grafted watermelon seedlings

SUN Xiaomei¹, CHEN Sijin², YANG Liuyan², Li Jinxia¹, ZHOU Bin¹, CHEN Nianlai¹

(1. College of resources and environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to explore the salt adaptability of grafted watermelon with blight resistance and to obtain a combination of salt tolerance with blight tolerance, an experiment was conducted to investigate the effects of NaCl stress on biomass per plant, photosynthesis, water use efficiency (WUE), leaf stoichiometric characteristics among own-root seedling of Jingxinerhao and two grafted watermelon seedling [(Bj-6×893)+Jingxinerhao] and [(Bj-9×341)+Jingxinerhao]. The findings showed that grafted watermelon seedlings had lower shoot-root ratio, photosynthesis, and C : N ratio than those in [(Bj-6×893)+Jingxinerhao] (9.6%, 44.2% and 15.5%) and [(Bj-9×341)+Jingxinerhao] (21.1%, 30.1% and 23.0%). While biomass per plant, photosynthesis, potassium concentration and C : P ratio in [(Bj-9×341)+Jingxinerhao] were significantly lower than those in [(Bj-6×893)+Jingxinerhao] by 9.7%, 20.2%, 70.3%, and 24.9%, respectively. Compared to control, salt stress significantly decreased photosynthesis (60.3%, 45.8% and 41.9%) and C : K ratio (48.2%, 35.2% and 59.4%) in own-root seedling, [(Bj-6×893)+Jingxinerhao] and [(Bj-9×341)+Jingxinerhao], while significantly increased potassi-

收稿日期:2019-06-09 修回日期:2020-01-10

基金项目:甘肃农业大学科技创新基金项目(学科建设专项基金)(GSAU-XXJS-2018-214);甘肃省农业生物技术研究与应用开发项目(GNSW-2015-17);甘肃省自然科学基金(18JR3RA187)

作者简介:孙小妹(1986-),女,甘肃临洮人,讲师,主要从事植物生理生态研究。E-mail:sunxiaomei86@163.com

通信作者:陈年来(1962-),男,甘肃民勤人,教授,主要从事作物育种研究。E-mail:chenml@gsau.edu.cn

um concentration by 44.8%, 27.8%, and 56.8% in the materials. The *WUE* significantly increased with salt addition by 33.5% and 14.3% in [(Bj-6×893) + Jingxinerhao] and [(Bj-9×341) + Jingxinerhao]. Salt stress had significant positive effect on C : N (18.7%) and C : P (15.5%) in [(Bj-9×341) + Jingxinerhao]. Based on above results and redundancy analysis, own-root seedling may improve its salt tolerance with increasing potassium concentration, while two grafted seedlings may simultaneously enhance *WUE* and potassium concentrations to improve their salt tolerance. The salt tolerance of grafted seedlings [(Bj-6×893) + Jingxinerhao] was greater than that of [(Bj-9×341) + Jingxinerhao].

Keywords: NaCl stress; grafted watermelon seedling; stoichiometric characteristics of C, N, P and K; salt adaptation

西瓜(*Citrullus lanatus*)作为我国重要的园艺产业,其生产面积和产量均居世界首位。由于大规模的专业生产,西瓜连作障碍日益突出,枯萎病(*Fusarium oxysporum sp. niveum*)相应成为西瓜生产上最严重的病害之一^[1]。在重茬地枯萎病导致产量大幅下降,严重时甚至绝收。与此同时,种植过程中由于肥料的不合理施用,使土壤盐类积聚,土壤盐渍化日趋严重,西瓜的产量和品质同时受到枯萎病和盐胁迫的双重影响^[2]。利用抗枯萎病砧木的根系嫁接栽培,不但能有效控制枯萎病的危害,而且是减缓西瓜遭受盐分伤害可靠易行的措施^[3]。因此,探究嫁接西瓜的盐适应性,获得抗枯萎病的耐盐组合,有利于我国西瓜产业的可持续发展。

N、P、K是植物生长发育过程中所必需的矿质营养元素,其在植物组织结构、碳代谢过程和细胞渗透调节过程中起重要作用^[4-5]。然而,盐胁迫会对植物营养元素的吸收和运输过程产生抑制,造成矿质营养元素的失衡,是盐胁迫主要的影响效应之一^[6]。例如,盐胁迫使橄榄和侧柏叶片中N、P、K含量下降^[7-8],而酸橘和番茄叶片中的P、K含量却随盐胁迫而上升^[9-10]。盐胁迫在造成矿质营养元素失衡的同时,必定会改变营养元素的利用效率^[11]。生态化学计量学提供了一种新的探究植物—土壤间相互作用与C、N、P循环的研究方法,利用植物的元素计量比特征反映出有机体对逆境的响应和适应能力^[12]。例如在干旱生境下,平车前通过改变光合速率、蔗糖合成酶和硝酸还原酶活性等生理反应,调节C、N、P代谢及循环,呈现出特定的C : N : P计量比特征^[13]。榆树在重度干旱胁迫下,叶片中C : N相较对照上升,在轻度和中度水分胁迫下C : N下降,而C : P随水分胁迫加剧而上升,即榆树通过吸收叶片中营养元素X含量及调节C : X来适应干旱生境^[14]。由于C : X能够反映出植物对营养元素的利用效率^[15],因此,分析植物对环境响应的生态化学计量比特征可为揭示植物响应逆境的机制

提供新思路^[16]。此外,生物量是评价盐分伤害的关键指标,而光合特性表征植物的碳同化能力^[17]。

目前关于盐分胁迫对嫁接西瓜组合耐盐性机理的研究多集中于抗氧化系统^[18]、光合特性和叶绿体超微结构^[9]以及Na⁺、K⁺含量与分布等方面^[19],基于盐分胁迫对嫁接西瓜营养元素积累及利用效率的研究鲜见报道^[20],因此,探究嫁接西瓜组合的营养元素含量及其利用效率对盐分胁迫的响应,不仅能为盐胁迫下植物营养元素含量的变化提供更多实证,而且能揭示嫁接西瓜组合对盐胁迫的适应机制。

基于N、P、K是植物生长发育过程中所必需的矿质营养元素,本文选取2个自育抗枯萎病西瓜组合,以京欣二号为接穗,研究西瓜自根苗和嫁接苗的生态化学计量比特征、光合特性和生物量对盐分胁迫的响应,以及西瓜嫁接组合的营养元素含量对盐胁迫的响应,为盐胁迫下植物营养元素的变化提供实证;并为探明嫁接西瓜组合的耐盐机理,获得抗枯萎病的耐盐组合提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

接穗为设施栽培常用西瓜品种京欣二号,由北京蔬菜研究中心育成。选取2份已鉴定的高抗枯萎病组合,为西瓜属栽培种与野生材料配置的三交组合:(栽培种×野生种)×(野生种),代码为BJ-6×893和BJ-9×341。

1.2 试验设计

试验于2017年4—8月进行,于穴盘中播种3个试验材料,待幼苗长到二叶一心期时,分别以BJ-6×893和BJ-9×341做砧木,嫁接京欣二号,以京欣二号自根苗为对照。待到幼苗长到四叶一心期时开始处理:对照(浇灌50%浓度的hoagland营养液)和盐胁迫(浇灌含100 mmol·L⁻¹ NaCl的50% hoagland营养液),3次重复,每份材料的总株数为90株。

1.3 测定指标及方法

盐胁迫处理14 d后采摘健康的功能叶,带回实

验室,于 60℃烘至恒重,研磨后过 80 目筛,用于 C、N、P、K 含量的测定。全碳测定采用重铬酸钾容量法(外加热法),全氮测定采用凯氏定氮法,全磷测定采用钼锑抗比色法,全钾测定采用火焰分光光度法。

选择在晴天早晨 9:00~11:30 利用 CIRAS-2 型便携式光合测定系统(PP-system, 英国)同步测定功能叶片气体交换参数,选用标准光源,光合有效辐射控制为 1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹,计算瞬时水分利用效率(water use efficiency, WUE,mmol·mol⁻¹),WUE = P_n/Tr。每个处理 3 次重复,每次重复测定 5 株。

胁迫 20 d 后,每个处理取 5 株,在水中清洗根系,按照地上、地下两部分分开装袋。于 105℃杀青 30 min,80℃烘 36 h 至恒重,用于计算生物量。

1.4 数据分析

利用 IBM SPSS 16.0 统计软件进行方差分析, Duncan 多重比较法进行参试材料间各指标的差异显著性分析,配对 T 检验用于分析盐胁迫对营养元素含量及其计量比特征、光合特性和生物量的影响;在 Canoco 4.5 中做冗余分析(RDA)。作图在 GraphPad Prism 上实现。

2 结果与分析

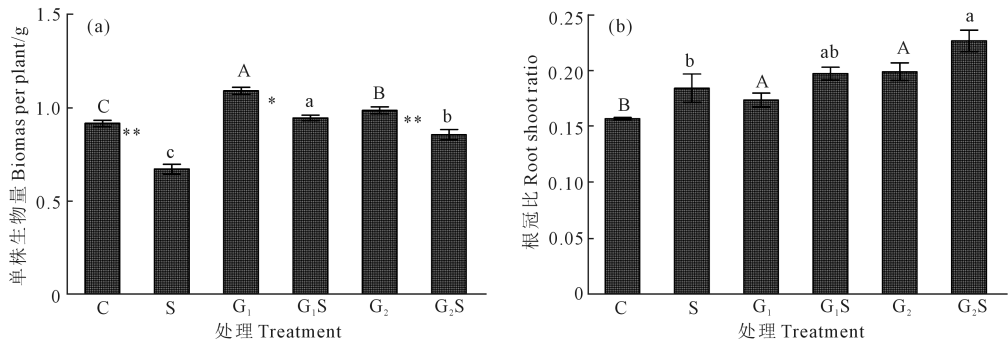
2.1 盐胁迫对生物量的影响

嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]和[(Bj-9×

341)+京欣二号]的整株生物量和根冠比在对照和盐胁迫处理下显著大于自根苗京欣二号(图 1)。盐胁迫使自根苗的整株生物量和根冠比分别显著下降和上升,而嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]和[(Bj-9×341)+京欣二号]的整株生物量和根冠比在处理间绝对值虽然有所下降和上升,但差异不显著;3 份材料整株生物量和根冠比的降幅和升幅分别为 26.7%和 14.9%(自根苗京欣二号)、13.3%和 11.9%[(Bj-6×893)+京欣二号]及 13.2%和 12.2%[(Bj-9×341)+京欣二号]。

2.2 净光合速率和瞬时水分利用效率对盐胁迫的响应

比较 3 份参试材料的净光合速率,在对照和盐胁迫处理下嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]显著高于[(Bj-9×341)+京欣二号]和自根苗(P<0.05);盐胁迫同时显著降低 3 份材料的净光合速率(图 2a)。3 份材料的瞬时水分利用效率在对照处理下差异不显著,盐胁迫下表现为嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]>[(Bj-9×341)+京欣二号]>自根苗(P<0.05);与对照相比,盐胁迫显著降低自根苗的水分利用效率,而显著提高嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]和[(Bj-9×341)+京欣二号]的水分利用效率,分别提高了 33.5%和 14.3%(图 2b)。



注:大写字母表示无盐胁迫时 3 份材料间差异显著(P<0.05),小写字母表示盐胁迫时 3 份材料间差异显著(P<0.05),处理间的差异显著性用*表示,其中*、**、***分别在P<0.05、P<0.01、P<0.001 水平差异显著。C:自根苗对照;S:自根苗盐胁迫处理;G₁:嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]对照;G₁S:嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]盐胁迫;G₂:嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]对照;G₂S:嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]盐胁迫。下同。

Note: Capital letters indicate significant differences among materials under control (P<0.05), lowercase letters indicate significant differences among materials under salt stress (P<0.05). * means significant difference between control and salt stress at different levels (* <0.05, ** <0.01, and *** <0.001). C: The grafted seedlings without salt stress; S: The grafted seedlings with salt stress; G₁: Own-root seedlings of (Bj-6×893+Jingxinerhao) without salt stress; G₁S: Own-root seedlings of (Bj-6×893+Jingxinerhao) with salt stress; G₂: Own-root seedlings of (Bj-9×341+Jingxinerhao) without salt stress; G₂S: Own-root seedlings of (Bj-9×341+Jingxinerhao) with salt stress. The same below.

图 1 盐胁迫对参试材料生物量及根冠比的影响

Fig.1 Effects of salt stress on biomass and root : shoot ratio among materials

2.3 C、N、P、K 含量及其计量比特征对盐胁迫的响应

2.3.1 C、N、P 和 K 含量对盐胁迫的响应 比较自根苗与嫁接苗间的特性,在对照和盐胁迫条件下,嫁接苗和自根苗间 C 含量差异不显著 ($P>0.05$),自根苗的 N 含量明显高于嫁接苗 ($P<0.05$) (表 1)。P 含量在对照处理下,嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号]与自根苗间差异不显著,却显著大于嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号] ($P<0.05$)。自根苗和嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]的 K 含量在对照条件下差异不显著,但显著高于嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号];盐分胁迫下,K 含量表现为自根苗>嫁

接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]>[(Bj-9×341)+京欣二号]。

比较对照与盐胁迫处理发现,盐分胁迫对 3 份材料的 C 含量影响不显著 ($P>0.05$),但显著降低自根苗和嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号]的 N (17.9%和 22.5%)、P (11.7%和 17.3%) 含量,而嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]的 N、P 含量受到盐胁迫的抑制作用不显著(表 1)。对于 3 份材料叶片中的 K 含量而言,盐胁迫显著增加自根苗、嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]和 [(Bj-9×341)+京欣二号]中的 K 含量 ($P<0.05$),增加量分别为 44.7%、27.8%和 56.6%(表 1)。

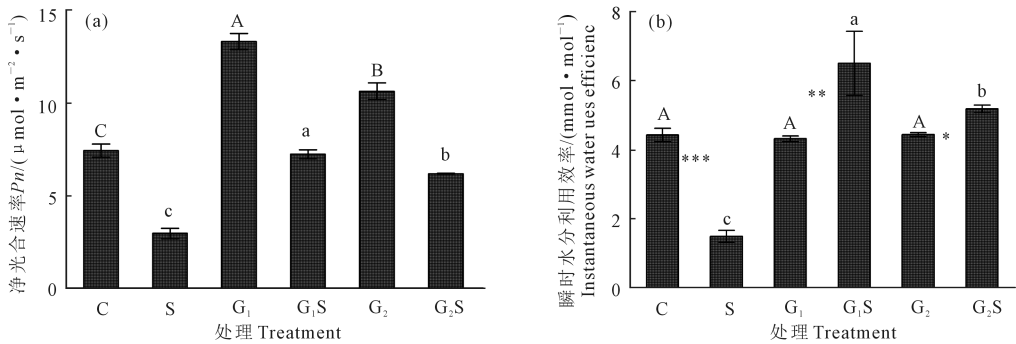


图 2 盐胁迫对参试材料净光合速率和瞬时水分利用效率的影响

Fig.2 Effects of salt stress on photosynthesis and instantaneous water use efficiency among materials

表 1 盐胁迫对参试材料 C、N、P 和 K 含量的影响/(mg·g⁻¹)

Table 1 Effects of salt stress on the concentration of C, N, P and K among materials

材料 Material	C		N		P		K	
	对照 Control	盐胁迫 Salt stress	对照 Control	盐胁迫 Salt stress	对照 Control	盐胁迫 Salt stress	对照 Control	盐胁迫 Salt stress
自根苗京欣二号 Grafted seedling of Jingxinerhao	352.6±6.0a	330.8±4.7a	8.76±0.2a	7.18±0.1a	2.47±0.6ab	2.18±0.1a	35.7±1.4a	64.7±1.8a
嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号] Own-root seedling of (Bj-6×893+Jingxinerhao)	357.1±9.7a	325.6±8.7a	7.51±0.2b	6.88±0.1b	1.86±0.3c	1.66±0.3a	37.7±3.6a	52.2±1.3b
嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号] Own-root seedling of (Bj-9×341+Jingxinerhao)	384.7±6.5a	365.6±19.2a	7.33±0.1b	5.68±0.4c	2.66±0.3a	2.20±0.6a	11.2±1.0b	25.9±1.5c

注:表中数据为平均值±标准误,n=3。同列不同字母表示材料间差异显著($P<0.05$)。
Note: The data in the table are mean value ±SE, n=3. Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.3.2 C : N、C : P 和 C : K 对盐分胁迫的响应

比较参试材料的矿质元素计量比特征,NaCl 处理下嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号]的 C : N 显著高于嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]和自根苗 ($P<0.05$) (图 3a)。C : P 在对照处理下表现为嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]>[(Bj-9×341)+京欣二号]≥自根苗,在 NaCl 处理下嫁接苗的 C : P 显著高于自根苗(图 3b)。在对照和 NaCl 处理下,嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号]的 C : K 分别比嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]和自根苗显著高 71.5%、

63.7% 和 72.3%、55.8% ($P<0.05$) (图 3c)。

盐胁迫使嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号]的 C : N 与 C : P 显著增大 ($P<0.05$),而对嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]影响不显著。盐胁迫显著降低自根苗、嫁接苗 [(Bj-6×893)+京欣二号]和嫁接苗 [(Bj-9×341)+京欣二号]的 C : K,降幅分别为 48.2%、35.2%和 59.4%。

2.4 生物量与叶片性状间的关联性

RDA 分析表明自根苗单株生物量高时对应着高的叶片 N 含量、C : K、 P_n 、WUE 和低的叶片 K 含

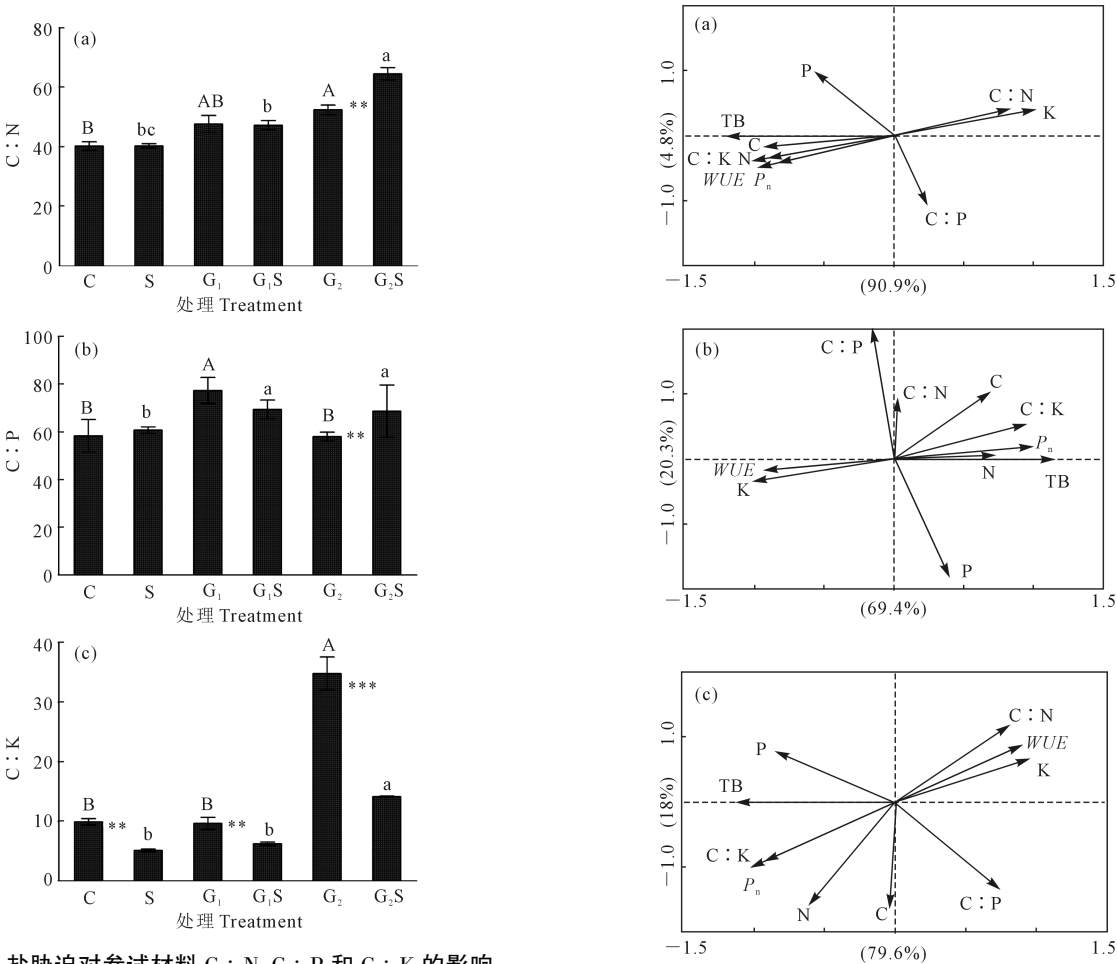


图 3 盐胁迫对参试材料 C : N、C : P 和 C : K 的影响
Fig.3 Effects of salt stress on C : N, C : P and C : K among materials

量(图 4a)。即盐胁迫阻碍了自根苗叶片 N 含量的累积,使 P_n 和叶片瞬时 WUE 下降,通过渗透调节(叶片 K 含量增加)减缓盐胁迫的伤害。嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的单株生物量与叶片 N、C : K、 P_n 正相关,而与 K 含量和 WUE 负相关(图 4b)。嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]则表现为单株生物量与 P、C : K、 P_n 正相关,与 K 含量和 WUE 负相关(图 4c)。

3 讨论与结论

3.1 盐胁迫对 C、N、P、K 含量的影响

盐胁迫对自根苗和嫁接苗叶片 C 含量的影响不显著,但对照条件下 C 含量绝对值要高于盐胁迫处理(表 1)。由于盐胁迫造成土壤中低的水势使叶片水势^[21]和气孔导度降低^[22],减少气孔中 CO₂ 的进入,抑制光合作用,从而降低了碳固定,使生物量积累减少^[23-24]。此外,植物需要消耗额外的能量去应对盐胁迫,从而导致代谢损耗的增加^[25]。盐胁迫显著降低自根苗和嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二

注:C:叶片碳含量;N:叶片氮含量;P:叶片磷含量;K:叶片钾含量;C : N:叶片 C/N 比;C : P:叶片 C/P 比;C : K:叶片 C/K 比; P_n :叶片净光合速率; WUE :叶片水分利用效率;TB:单株生物量。
Note: C: leaf carbon concentration; N: leaf nitrogen concentration; P: leaf phosphorus concentration; K: leaf potassium concentration; C : N: leaf carbon: nitrogen ratio; C : P: leaf carbon: phosphorus ratio; C : K: carbon: potassium ratio; P_n : leaf photosynthesis; WUE : leaf water use efficiency; TB: total biomass per plant.
图 4 基于 RDA 分析的生物量与叶片性状关联性
Fig.4 The relationship between biomass and leaf traits based on redundancy analysis (RDA)

号]的 N、P 含量;而嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的 N、P 含量受到盐胁迫的抑制作用不显著,但绝对值有所下降,表明嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的耐盐性要强于其他两份材料(表 1)。可能是由于 Cl⁻ 的富集减少了对 N 和 P 的吸收^[26-27],阻碍了 N、P 的代谢过程^[28]。N、P 为构成叶绿体结构中叶绿素、蛋白质和片层膜的主要元素,对光合作用和叶绿体中各类酶的形成起关键作用^[29]。因此,盐胁迫阻碍了 N、P 代谢,使光合机构发育受损,对光合作用的抑制效应加剧,使西瓜材料的耐盐性减弱^[23]。

植物原生质体持 K^+ 的能力已被认为是植物抗盐的重要标志^[24]。现有研究表明盐胁迫对 K 含量的影响规律不一致:唐晓倩等^[8]发现盐胁迫使侧柏叶片 K 元素含量下降,而有些植物叶片中 K 含量随盐胁迫而上升^[9-10],嫁接柑橘叶片 K 含量则在低盐胁迫下显著提高,而在高盐胁迫下有所下降^[17]。本研究中,与对照相比 $100\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 添加条件下自根苗和嫁接苗叶片中 K 含量显著增加(表 1)。西瓜材料通过增加 K 元素含量,调节渗透势缓解盐害^[30-31]。如果盐胁迫浓度继续增大,可能会导致 K 含量的下降。因为 Na^+ 与 K^+ 间存在竞争同一转运蛋白结合位的关系,高浓度的 NaCl 胁迫最终会使植物体内 K^+ 含量下降^[32]。

3.2 盐胁迫对 C : N、C : P 和 C : K 计量比的影响

植物组织中养分含量的差异反映出植物特征和生理机制的差异,植物的 C : N、C : P 和 C : K 表征植物所吸收矿质营养元素对碳的同化能力,不仅能够反映出植物对营养元素 N、P 和 K 的利用效率,同时有效反映植物对逆境的适应策略^[15]。研究表明盐胁迫造成矿质营养元素失衡的同时,改变了对营养元素的利用效率^[6]。本研究中,在盐胁迫条件下,嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号]显著提高 C : N 与 C : P,即提高对 N 和 P 的利用效率,而嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的 C : N 与 C : P 绝对值也是增大的(图 3a,图 3b)。这与 Vitousek 等^[15]的研究结果一致,营养资源匮乏的生境中,植物体内的 C : X(营养元素)增大,植物会提高对营养元素 X 的利用效率。对于西瓜材料, Cl^- 的富集减少了对 N 和 P 的吸收^[28]。为了使 N、P 含量满足其自身代谢的需求,西瓜嫁接材料利用保守型的策略,显著提高对 N、P 的利用效率。对于 K 的利用效率,3 份材料均表现为在盐胁迫条件下有所下降(图 3c)。盐胁迫使 3 份西瓜材料 K 含量显著上升,由于在资源充裕的状况下,植物通常会呈现低的 C : X,采取奢侈的利用策略,对充裕资源的利用效率降低^[33],故而呈现出 3 份西瓜材料 C : K 降低,即对 K 采取奢侈利用的策略。

3.3 嫁接组合耐盐性比较

生物量是衡量盐分伤害的关键指标,而光合特性表征植物的碳同化能力。在对照与盐胁迫条件下,2 份嫁接材料较自根苗具有高的生物量和 P_n (图 2),其中嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的整株生物量和 P_n 值要大于嫁接苗[(Bj-9×341)+京欣二号],即嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的耐盐性要强于[(Bj-9×341)+京欣二号]。由于砧木材料

庞大的根系系统受盐胁迫的伤害较小,生长势更强^[34],表现出高的净光合速率和生物量^[18]。本研究中根冠比的变化也证实了这种推测(图 1b)。基于 RDA 的分析表明,盐胁迫阻碍了西瓜材料对叶片 N、P 含量的积累,使 P_n 降低;通过增加自根苗的叶片 K 含量来减缓盐胁迫伤害,而嫁接苗通过增加对 K 的积累和提高 WUE 两条途径来应对盐胁迫。这与其他研究结果一致,植物通过增加对 K^+ 的吸收调节渗透势和 WUE 来应对盐胁迫^[30-31,35]。关于盐胁迫使瞬时 WUE 提高,可能是由于气孔导度的下降使气孔阻力增加,蒸腾速率的降幅相较于净光合速率的降幅要大,故而使 WUE 增大^[12]。虽然 2 份嫁接苗均采取了增加叶片 K 含量积累和提高 WUE 来应对盐胁迫,但是嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的 WUE 对盐胁迫响应的增幅比[(Bj-9×341)+京欣二号]高 19.2%(图 2b),这也可能是嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]耐盐性强于[(Bj-9×341)+京欣二号]的原因之一。当然,嫁接苗利用 WUE 提高应对盐胁迫的策略不是无限的。因为随着 NaCl 溶液浓度的增大,植株叶片的膨压逐渐下降,叶片含水量继续降低,光合能力持续减弱,从而导致 WUE 的降低^[35]。

综上所述,嫁接苗较自根苗在生物量积累、根冠比、净光合速率、瞬时 WUE 和 N、P、K 利用效率方面占优势。盐胁迫显著提高了 3 份材料的叶片 K 含量,降低了整株生物量、净光合速率、N、P 含量和 C : K。基于 RDA 分析获得 3 份材料的耐盐性机理:自根苗主要通过调节叶片 K 含量来缓解盐胁迫,嫁接苗则通过提高叶片 K 含量和 WUE 来增强耐盐性。其中嫁接苗[(Bj-6×893)+京欣二号]的耐盐性强于[(Bj-9×341)+京欣二号],与其相对高的 WUE 相关。

参考文献:

- [1] 吴会杰,范琳娟,古勤生.西瓜枯萎病菌的鉴定及申腺毒素对其防效评价[J].中国农学通报,2016,32(28):131-135.
- [2] 阳燕娟,郭世荣,于文进.嫁接对盐胁迫下西瓜幼苗体内离子和源激素含量与分布的影响[J].西北植物学报,2015,35(3):500-507.
- [3] Yang Y J, Wang L P, Tian J, et al. Proteomic study participating the enhancement of growth and salt tolerance of bottle gourd rootstock-grafted watermelon seedlings [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 58:54-65.
- [4] Wasaya A, Tahir M, Ali H, et al. Influence of varying tillage systems and nitrogen application on crop allometry, chlorophyll contents, biomass production and net returns of maize (*Zea mays* L.) [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 170:18-26.
- [5] Xie H T, Yu M, Cheng X. Leaf non-structural carbohydrate allocation

and C : N : P stoichiometry in response to light acclimation in seedlings of two subtropical shade-tolerant tree species [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 124:146-154.

[6] Farissi M, Faghire M, Bargaz A, et al. Growth, nutrients concentrations, and enzymes involved in plants nutrition of alfalfa populations under saline conditions [J]. Journal of Agricultural Science & Technology, 2014, 16(2):301-314.

[7] Loupassaki H, Chartzoulakis S, Digalaki B, et al. Effects of salt stress on concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sodium in leaves, shoots, and roots of six olive cultivars [J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(11):2457-2482.

[8] 唐晓倩, 刘广亮, 刘广全. NaCl 胁迫对侧柏幼苗生长及矿质离子吸收和分配的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9):1-7.

[9] Roussos A, Gasparatos D, Kyriakou C, et al. Growth, nutrient status, and biochemical changes of sour orange plants subjected to sodium chloride stress [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(4):805-816.

[10] Fan M L, Bie Z L, Krumbein A, et al. Salinity stress in tomatoes can be alleviated by grafting and potassium depending on the rootstock and K-concentration employed [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1):615-623.

[11] Dawood G, Abdelhamid T, Schmidhalter U. Potassium fertiliser enhances the salt-tolerance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2014, 89(2):185-192.

[12] Ventura M, Liboriussen L, Lauridsen T, et al. Effects of increased temperature and nutrient enrichment on the stoichiometry of primary producers and consumers in temperate shallow lakes [J]. Freshwater Biology, 2010, 53(7):1434-1452.

[13] Li Z, Bai W, Zhang L, et al. Increased water supply promotes photosynthesis, C/N ratio, and plantamajoside accumulation in the medicinal plant *Plantago depressa* Willd [J]. Photosynthetica, 2016, 54(4):1-9.

[14] 王凯, 沈潮, 孙冰, 等. 干旱胁迫对科尔沁沙地榆树幼苗 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2286-2294.

[15] Vitousek, P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. American Naturalist, 1982, 119(4):553-572.

[16] Lü X T, Kong D L, Pan Q M, et al. Nitrogen and water availability interact to affect leaf stoichiometry in a semi-arid grassland [J]. Oecologia, 2012, 168(2):301-310.

[17] Khoshbakht D, Ramin A, Baninasab B. Effects of sodium chloride stress on gas exchange, chlorophyll content and nutrient concentrations of nine citrus rootstocks [J]. Photosynthetica, 2015, 53(2):241-249.

[18] 朱士农, 郭世荣, 张爱慧, 等. NaCl 胁迫对西瓜嫁接苗叶片抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(11): 2285-2291.

[19] 朱士农, 郭世荣. 嫁接对盐胁迫下西瓜植株体内 Na⁺ 和 K⁺ 含量及其分布的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(6), 814-820.

[20] 阳燕娟, 郭世荣, 于文进. 瓠瓜砧木与西瓜嫁接对盐胁迫下植株根系氮素吸收和同化的影响[C]//中国园艺学会. 中国园艺学会 2014 年学术年会论文摘要集, 北京, 中国农业科学技术出版社, 2014:82.

[21] Flowers J, Colmer D. Salinity tolerance in halophytes [J]. New Phytologist, 2010, 179(4):945-963.

[22] Rahnama A, James A, Poustini K, et al. Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil [J]. Functional Plant Biology, 2010, 37(3):255-263.

[23] Munns, R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses [J]. Plant Cell & Environment, 2010, 16(1):15-24.

[24] Setia R, Gottschalk P, Smith P, et al. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks [J]. Science of the Total Environment, 2013, 465:267-272.

[25] Chaves M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. annals of botany, 2008, 103(4):551-560.

[26] Akça Y, Samsunlu E. The effect of salt stress on growth, chlorophyll content, proline and nutrient accumulation, and K⁺/Na⁺ ratio in walnut [J]. Pakistan Journal of Botany, 2012, 44:1513-1520.

[27] Gomes C, Suzuki S, Cunha D, et al. Effect of salt stress on nutrient concentration, photosynthetic pigments, proline and foliar morphology of *Salvinia auriculata* Aubl [J]. Acta Limnologica Brasiliensia, 2011, 23:164-176.

[28] Debouba M, Gouia H, Suzuki H. NaCl stress effects on enzymes involved in nitrogen assimilation pathway in tomato "*Lycopersicon esculentum*" seedlings [J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(12): 1247-1258.

[29] Domingues F, Meir P, Feldpausch R, et al. Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa woodlands [J]. Plant Cell & Environment, 2010, 33(6):959-980.

[30] Lissbrant S, Stratton S, Cunningham M, et al. Impact of long-term phosphorus and potassium fertilization on alfalfa nutritive value - yield relationships [J]. Crop Science, 2009, 49(3):11-16.

[31] 王树凤, 胡韵雪, 李志兰, 等. 盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿质离子吸收、运输和分配的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(17), 4609-4616.

[32] Lotfi N, Vahdati K, Kholdebarin B, et al. Mineral composition of some walnut cultivars (*Juglans regia* L.) for evaluation of ionome and ionomics under salt stress condition [J]. Acta Horticulturae, 2009, 839:293-300.

[33] Sun X M, Yu K L, Shugart H H, et al. Species richness loss after nutrient addition as affected by N:C ratios and phytohormone GA₃ contents in an alpine meadow community [J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(2):201-211.

[34] 张爱慧, 刘广勤, 朱士农, 等. NaCl 胁迫对嫁接西瓜抗氧化酶及叶绿素荧光参数的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(2):377-382.

[35] Jain G, Gould S. Functional significance of betalain biosynthesis in leaves of *Disphyma australe* under salinity stress [J]. Environmental & Experimental Botany, 2015, 109(9):131-140.