

氯盐胁迫下氮素对西瓜根系生长的调控作用

柳 雪¹, 王湘银¹, 李雪芳¹, 王西娜^{1*}, 马耀海¹, 谭军利²

(1 宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021)

摘 要: 为揭示氯盐胁迫下氮素对西瓜根系的调节机制和提供西瓜氯毒害调控理论依据, 以西瓜为供试作物, 采用土培试验, 研究不同施氮量(0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 g/kg)对氯盐胁迫下西瓜根系的影响, 并应用主成分分析法对各施氮量下根系生长情况进行综合评价。结果表明, (1) 与不施氮相比, 施氮 0.15 g/kg 处理可使西瓜根系生物量、干物质累积量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、根系活力分别显著提高 58.83%、20.83%、98.33%、70.37% 和 29.44%, 丙二醛含量显著降低 40.30%, 同时使总根长、总根表面积、根尖数、分枝数分别显著增加 103.42%、46.41%、64.44%、87.80%, 总根体积和总根系直径分别减少 23.05% 和 40.15%。(2) 在本试验氯盐胁迫条件下, 施氮 0.14~0.17 g/kg 时西瓜具有较理想的根系构型和较高的根系活力。(3) 根系分枝数、根系活力、总根体积、根尖数可作为氯盐胁迫下氮素对西瓜根系生长影响的综合评价指标, 各施氮水平对氯盐胁迫的缓解效果表现为 0.15 g/kg > 0.20 g/kg > 0.10 g/kg > 0.25 g/kg。可见, 在氯盐胁迫下, 适量施氮有助于西瓜建立良好的根系构型, 提高根系渗透物质含量, 降低细胞渗透势, 减少根系丙二醛含量, 维持较强的根系活力, 增加根系生物量和干物质, 缓解高浓度氯盐对西瓜生长的抑制作用。

关键词: 氯盐胁迫; 西瓜; 根系构型; 根系生物量; 根系活力

中图分类号: Q945.78; S651

文献标志码: A

Regulation of Nitrogen on Watermelon Root Growth under Chlorine Salt Stress

LIU Xue¹, WANG Xiangyin¹, LI Xuefang¹, WANG Xina^{1*}, MA Yaohai¹, TAN Junli²

(1 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to reveal the regulating mechanism of nitrogen on watermelon root under chlorine salt stress, and provide theoretical basis for chlorine toxicity control of watermelon, a soil culture experiment was conducted to study the effects of different N levels (0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 g/kg) on watermelon root under the chlorine salt stress. Meanwhile, principal component analysis was used for comprehensive evaluation of root growth situation. The results showed that: (1) Compared with no nitrogen treatment, as nitrogen level was 0.15 g/kg, the root biomass, dry matter accumulation, proline content, soluble sugar content, and root activity were significantly increased by 58.83%, 20.83%, 98.33%, 70.37% and 29.44%, and malondialdehyde content was significantly decreased by 40.30%, moreover, total root length, root surface area, root number, and branch number were increased 103.42%, 46.41%, 64.44%,

收稿日期: 2022-11-03; 修改稿收到日期: 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860590, 31460546); 宁夏自然科学基金项目(2022AAC02013)

作者简介: 柳 雪(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: 2537531809@qq.com

* 通信作者: 王西娜, 女, 副教授, 主要从事植物营养高效利用与调控研究。E-mail: eunicexina-w@163.com

and 87.80%, but total root volume and total root diameter were decreased by 23.05% and 40.15%, respectively. (2) Watermelon had ideal root system configuration and higher root activity when N was applied at 0.14–0.17 g/kg under chlorine salt stress in this test. (3) Root branch number, root activity, the total number of root volume could be used as the comprehensive index to evaluate influence of nitrogen on root growth under chloride salt stress, and alleviating effect of nitrogen level on chlorine salt stress was shown as 0.15 g/kg > 0.20 g/kg > 0.10 g/kg > 0.25 g/kg. Visibly, it could conclude that a moderate amount of nitrogen helps watermelon to establish a good root system configuration, increase root penetration levels, and reduce cell osmotic potential and malondialdehyde content, maintain strong root activity, enhance biomass and dry matter, and thus alleviate high concentrations of chloride salt inhibition for the growth of watermelon.

Key words: chlorine salt stress; watermelon; the root system configuration; root biomass; root activity

西瓜是宁夏的主要经济作物之一,由于当地干旱少雨,农民长期使用含氯 30 mmol/L 左右的地下水微咸水进行补灌,导致忌氯作物西瓜产生氯毒害现象。氮素是作物必需的营养元素之一,适量施用氮肥可在一定程度上缓解氯毒害作用。因此,研究氯盐胁迫下不同氮用量对西瓜生长生理的影响,对于揭示氮素缓解氯毒害机制和氯盐胁迫下通过合理施用氮肥调控西瓜氯毒害具有重要意义。根系是植物从土壤中吸收水分的主要部位,也是植物最先感受土壤逆境胁迫的部位,其生长情况和活力水平直接影响地上部的营养状况和产量水平^[1]。氯盐胁迫会导致作物渗透电位降低和有毒离子积累,为了应对渗透胁迫和氧化应激,植物在自然选择过程中进化出了复杂的胁迫适应机制^[2]。

根系作为植物吸收水分和养分的主要器官和感知外界胁迫水平的主要场所,更易对土壤中的氯盐胁迫做出响应,可以通过不同生理或形态变化来响应逆境胁迫信号进行自我调节,例如,改变其结构、提高可溶性糖和脯氨酸等有机渗透调节物质的含量等,但这种对胁迫的调节具有局限性^[3]。补充矿质营养可能是减轻盐胁迫最合适的策略之一^[4]。氮素作为植物生长发育所必需营养元素之一,适量施加氮肥有益于减轻非生物胁迫,缓解盐胁迫的毒害作用,提高植物对盐胁迫的抵抗能力^[5]。

研究发现,硝态氮会与外界环境中较高浓度的 Cl^- 产生拮抗作用,硝态氮吸收受到抑制,但当环境中硝态氮含量较高时,由于阴离子通道对硝酸根的选择性比氯离子强,则会抑制作物对氯离子的吸收,缓解氯离子的毒害作用,促进作物生长发育,提高产量及品质^[6]。Tian 等^[7]指出施氮能够提高油菜体内抗氧化酶活性及可溶性糖和脯氨酸含量,缓解盐胁迫对油菜苗的生长抑制,Nemat-Alla 等^[8]的研究结果表明,施氮可改善 NaCl 胁迫下玉米幼苗的光

合活性,修复抗氧化系统,有效降低盐胁迫造成的不利影响,而且尿素对于维持玉米高光合活性,提高抗氧化剂活力的效果最佳。张佳群等^[9]发现在含氯较高的微咸水滴灌条件下,适量施加氮肥可以促进压砂西瓜植株生长,提高产量和品质。盐胁迫是宁夏西瓜种植中面临的主要问题,前人的研究主要关注盐胁迫本身对作物生长、产量和品质的影响,而忽视了根系的响应变化及施肥的调控作用。

本研究拟通过土培试验,探讨氯盐胁迫下不同施氮水平对西瓜根构型及活力的影响,以期揭示氮素调节西瓜氯盐胁迫的机制,为调控西瓜氯毒害提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料选取当地普遍使用的西瓜 (*Citullus lanatus* Thunb.) 嫁接苗,接穗西瓜品种为‘金城 5 号’,砧木为‘金城雪峰白籽南瓜’。

1.2 试验设计

土培试验于 2022 年 5 月在宁夏大学农科实训基地日光温室中进行。根据本课题组前期研究结果,当土壤氯含量达到 156.82 mg/kg 时,西瓜生长明显受到抑制,因此,本试验以 0.16 g/kg 为氯胁迫浓度,在此基础上,设置 0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 g/kg(干土)5 个施氮水平,分别记为 N0、N10、N15、N20、N25,每个处理设置 3 个重复。

试验中氮源为尿素,在种植前 1 周按照试验设计称量尿素与土壤混匀后装入试验盆钵,浇水缓释,防止烧苗;磷肥 (P_2O_5) 选用重过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥 (K_2O) 选用 KCl(含 K_2O 60%),磷、钾肥施用量分别为 0.22 g/kg、0.083 g/kg,在移栽前与土壤混匀施入。

每盆装土 7 kg,按设计的氯胁迫浓度每盆土壤

应含氯 1.12 g (含量 0.16 g/kg),其中,盆栽土壤本底含氯 0.42 g (含量 0.06 g/kg),施入的钾肥中含氯 0.28 g,需再通过灌水补充氯 0.42 g,以 11.23 mmol/L Cl^- 溶液分 2 次灌入,每次灌水 1 L。氯源用 CaCl_2 和 NaCl ,按当地微咸水中 Cl^- 含量以 5:7 施入。

试验施入的总 NaCl 浓度为 10.74 mmol/L,高博文等^[10]的研究表明 NaCl 浓度超过 100 mmol/L 时才会导致西瓜生长发生钠毒害现象,因此,该浓度并不会对西瓜造成钠胁迫,但会对植物产生氯胁迫,因为西瓜对 Cl^- 比对 Na^+ 更敏感^[11]。 Cl^- 溶液灌入后继续培育 2 周时各个处理随机取样并重复 3 次。取样后立即带回实验室进行相关指标测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 根系构型

将根系洗净之后,使用根系扫描仪(WinRHIZO)测量总根长(RL)、总根体积(RV)、总根表面积(SA)、平均根系直径(RD)、根尖数(RT)、分枝数(RF);根据根系直径(RD,mm)将 RL、SA 和 RV 各划分为 I 级(0~0.1 mm)、II 级(0.1~0.2 mm)、III 级(0.2~0.3 mm)、IV 级(>0.3 mm)4 个区间等级。

1.3.2 根系生物量和干物质含量

将根系洗净之后,迅速吸干外部水分,称鲜重,然后在 105 °C 杀青 30 min,最后调节到 75 °C 烘干,计算水分和干物质含量。

1.3.3 根系生理指标

(1)根系丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法^[12]测定。称取 1 g 洗净吸干水分的根系,剪碎,加入 2 mL 10% 的三氯乙酸和少量石英砂,研磨至匀浆,再加 8 mL TCA 进一步研磨,匀浆在 4 000 r/min 离心 10 min,上清液即为样品提取液。吸取离心的上清液 2 mL(对照加 2 mL 蒸馏水),加入 2 mL 0.6% TBA 溶液,混匀后于沸水反应 15 min,迅速冷却后再离心 1 次,取上清液测定 450,532,600 nm 波长下的吸收度。

(2)根系活力采用 TTC 还原法测定^[12]。称取根尖样品 0.5 g,放入 10 mL 烧杯中,加入 0.4% TTC 溶液和磷酸缓冲液的等量混合液 10 mL,在 37 °C 下暗保温 1~3 h,此后加入 1 mol/L 硫酸 2 mL,停止反应。把根取出,吸干水分以乙酸乙酯研磨,提出甲瓞。红色提取液移入试管,并用少量乙酸乙酯把残渣洗涤 2~3 次,皆移入试管,最后加乙酸乙酯使总量为 10 mL,用分光光度计在波长 485 nm 下

比色。

(3)根系脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定^[13]。取根样 1 g 剪碎混匀置于大试管,加入 15 mL 3% 磺基水杨酸溶液,封口,于沸水浴中浸提 10 min 后取出试管,冷却至室温,过滤,吸取滤液 2 mL,同时做空白试验,两管各加 2 mL 冰醋酸和 2 mL 显色液,封口,于沸水浴中加热 30 min,冷却后加入 4 mL 甲苯充分振荡,以萃取红色物质,静置分层后吸取甲苯层,在波长 520 nm 下测定吸光值。

(4)可溶性糖含量采用蒽酮法测定^[13]。取根样 0.5 g,剪碎放入大试管,沸水浴浸提 20 min,转入 100 mL 容量瓶中,定容即为待测液,取 2 mL 待测液于试管中(蒸馏水做空白),分别沿管壁加入蒽酮—硫酸试剂 5 mL,猛摇试管 2~3 s,使液体充分摇匀,置试管架上放室温显色 10~15 min,在 620 nm 波长比色。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理,利用 SPSS pro 软件进行主成分分析,Origin 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 氯盐胁迫下施氮对西瓜根系构型的影响

由表 1 可知,适量施氮能够增加氯盐胁迫下西瓜幼苗的总根长(RL)、总根表面积(SA)、根尖数(RT)、分枝数(RF),降低其总根体积(RV)、根系平均直径(RD)。

其中,随着施氮量的增加,西瓜根系的 RL、SA、RF、RT 均呈先升后降的变化趋势,并均在施氮量为 0.15 g/kg 时(N15)时达到最大,此时比不施氮处理(N0)分别显著提高 103.42%、46.41%、87.80%、64.44%;西瓜根系 RD 则先降后升,并在 N15 时达到最低,此时比 N0 降低 40.15%,RV 却随施氮量增加呈降低趋势,但各施氮处理根系 RD 和 RV 变化均不显著。

另外,西瓜幼苗 I 和 III 根级的 RL、SA、RV 均在 N15 处理下达到最大值,I 根级的 RL 比 N0 显著提高 66.33%;II 根级的 RL 和 RV 也在 N15 处理时达到最大值,而其 SA 在 N20 处理时最大;IV 根级的 RL 在 N15 处理时最大,而其 SA 和 RV 则在施氮处理下出现降低现象,但未达到显著水平。可见,适量施氮可提高西瓜幼苗 RL、SA、RF、RT,改善了西瓜根系的生长状况(图 1),对根系氯胁迫有一定的缓解作用。

表 1 氯盐胁迫下不同氮水平对西瓜幼苗根系构型的影响

Table 1 Effects of different N levels on root architecture of watermelon seedling under chloride stress

指标 Index		施氮量 Nitrogen application level/(g/kg)				
		0(N0)	0.10(N10)	0.15(N15)	0.20(N20)	0.25(N25)
RL/cm	RL _{Total}	107.80±13.48c	118.92±4.31c	219.29±2.76a	173.78±5.33ab	151.74±12.50bc
	RL _I	52.66±6.22bc	42.50±5.71c	87.59±6.49a	85.48±7.45ab	56.62±0.76abc
	RL _{II}	45.32±3.30ab	30.84±4.46b	57.67±0.57a	46.69±3.47ab	41.17±3.93ab
	RL _{III}	24.66±5.21a	21.83±4.02a	39.92±3.97a	32.61±3.51a	32.64±4.00a
	RL _{IV}	10.67±1.76b	10.99±0.87b	20.15±2.28a	16.06±0.69ab	15.47±0.77ab
SA/cm ²	SA _{Total}	71.71±2.32c	89.15±2.30b	104.99±5.36a	88.78±1.81b	87.77±1.97b
	SA _I	1.23±0.22a	0.86±0.12a	1.78±0.09a	1.75±0.16a	1.17±0.21a
	SA _{II}	2.18±0.38ab	1.50±0.22b	2.81±0.03ab	2.93±0.19a	2.00±0.18ab
	SA _{III}	2.49±0.21ab	1.83±0.17b	3.14±0.32a	2.60±0.21ab	2.60±0.33ab
	SA _{IV}	2.29±0.10a	1.85±0.16a	2.22±0.13a	1.73±0.25a	1.69±0.25a
RV/cm ³	RV _{Total}	5.64±0.16a	5.00±0.26a	4.34±0.12a	4.26±0.49a	4.11±0.10a
	RV _I	0.24±0.04a	0.16±0.02a	0.33±0.01a	0.32±0.10a	0.22±0.04a
	RV _{II}	0.85±0.26a	0.60±0.15a	1.12±0.02a	0.90±0.23a	0.79±0.07a
	RV _{III}	1.60±0.13	1.16±0.23	1.99±0.21a	1.67±0.41a	1.66±0.21a
	RV _{IV}	2.07±0.31a	1.38±0.27a	2.01±0.30a	1.56±0.40a	1.52±0.24a
RD/mm		2.64±0.14a	2.25±0.22a	1.58±0.02a	1.61±0.25a	2.21±0.29a
RT		2 609.50±442.22c	2 676.67±160.72c	4 291.00±92.40a	3 580.33±903.32ab	3 191.17±57.79bc
RF		6 082.00±212.47d	7 545.50±237.72c	11 422.30±35.52a	8 672.67±78.39b	8 528.00±202.63b

注:RD. 根直径; I. $0 < RD \leq 0.1$ mm; II. $0.1 \text{ mm} < RD \leq 0.2$ mm; III. $0.2 \text{ mm} < RD \leq 0.3$ mm; IV. $RD > 0.3$ mm; RL. 根长; SA. 根表面积; RV. 根体积; RT. 根尖数; RF. 根分枝数。同行数据数后不同小写字母表示不同施氮水平间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: RD. Root diameter; I. $0 < RD \leq 0.1$ mm; II. $0.1 \text{ mm} < RD \leq 0.2$ mm; III. $0.2 \text{ mm} < RD \leq 0.3$ mm; IV. $RD > 0.3$ mm; RL. Root length; SA. Root surface area; RV. Root volume; RT. Number of root tips; RF. Number of root branches. Different lowercase letters indicate significant differences among different N levels ($P < 0.05$).

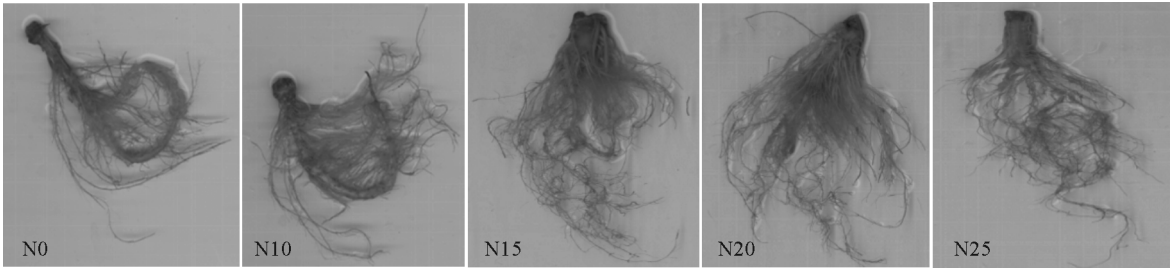


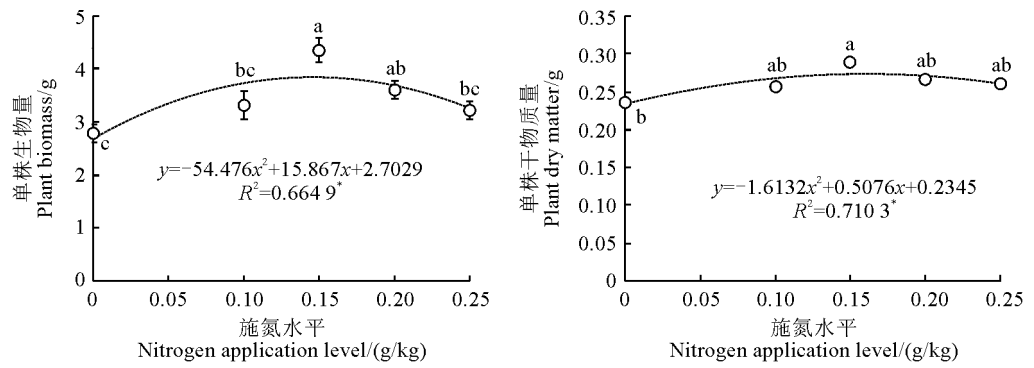
图 1 不同氮水平下西瓜幼苗根系构型

Fig. 1 Root system configuration of watermelon seedling under different N levels

2.2 氯盐胁迫下施氮对西瓜根系生物量和干物质积累的影响

适量施用氮肥能够明显促进西瓜根系生长,缓解氯盐胁迫。在氯盐胁迫下,西瓜幼苗根系生物量和干物质质量均随着施氮量增加而先升后降,并均在 N15 处理时达到最高值(图 2)。其中,西瓜根系生物量在 N15 和 N20 处理时显著高于不施氮 N0 处理,增加幅

度分别为 58.83%和 29.50%,根系干物质质量也在 N15 处理时比 N0 处理显著增加 20.83%;经曲线拟合发现,施氮量与根系生物量和干物质质量间均呈显著相关,相关系数 r 分别为 0.815 4* 和 0.842 8*,生物量和干物质达到最高时对应的施氮量分别为 0.15 和 0.16 g/kg。可见,氯盐胁迫下适量施氮可以显著促进西瓜幼苗根系生物量和干物质的积累。



不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平的差异显著性。下同。

图 2 不同氮水平下的西瓜幼苗根系生物量和干物质质量

Different lowercase letters mean significant difference among different treatments at 0.05 level. The same as below.

Fig. 2 Root biomass and dry matter of watermelon seedling under different N levels

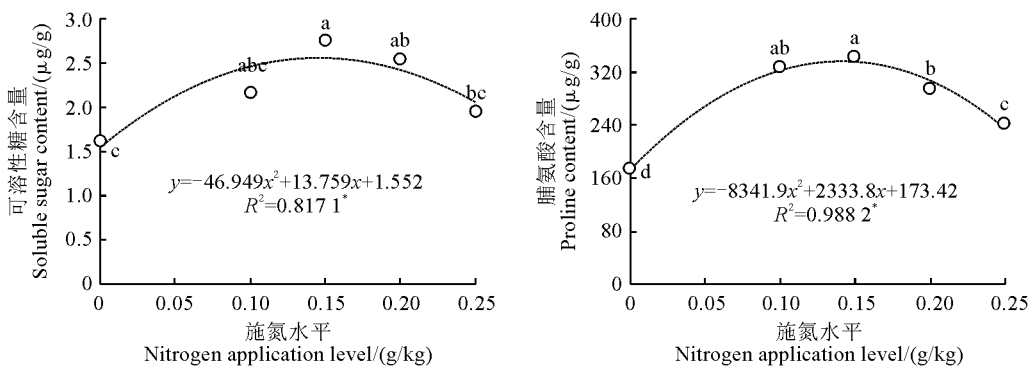


图 3 不同氮水平下西瓜幼苗根系的渗透调节物质含量

Fig. 3 The organic osmoregulation substances content in root of watermelon seedling under different N treatments

2.3 氯盐胁迫下施氮对西瓜根系有机渗透调节物质含量的影响

可溶性糖和脯氨酸的积累在一定程度上有利于缓解植物盐害。从图 3 看出,西瓜幼苗根系中脯氨酸和可溶性糖的含量受到施氮量的明显影响,并随着施氮量增加呈现先升后降的变化趋势,且均在 N15 处理时达到最大。其中,根系可溶糖含量在 N15 和 N20 处理时均显著高于 N0 处理,增幅分别为 70.37%和 57.41%,而在 N10 和 N25 处理下无显著变化;根系脯氨酸含量在各施氮处理下均比 N0 处理显著提高,增幅在 40.17%~98.33%之间,N15 处理又比 N20 和 N25 处理分别显著提高 21.99%和 41.48%。

对施氮量与可溶性糖和脯氨酸含量进行曲线拟合,其相关系数 r 分别为 0.903 9 和 0.994 1,均达到极显著水平,最高可溶性糖和脯氨酸含量对应的施氮量分别为 0.15 g/kg 和 0.14 g/kg。以上结果表明,适量施氮能够显著提高氯盐胁迫下西瓜幼苗根系有机渗透调节物质的含量,增强其渗透调节

能力。

2.4 氯盐胁迫下施氮对西瓜根系活力和丙二醛含量的影响

作物根系活力是反映根系生长和代谢强弱等生理功能的重要指标。对西瓜根系活力和施氮量进行曲线拟合发现,随施氮量增加,西瓜根系活力呈先增加后降低的趋势,且具有极显著的相关关系(图 4, A)。其中,在施氮 0.15,0.2,0.25 g/kg 时,西瓜根系活力分别较 N0 处理显著增加 29.44%、20.10%、17.78%;根系活力与施氮量间的相关系数 r (0.829 4)达到显著水平,最高根系活力时对应的施氮量为 0.17 g/kg。可见,氯盐胁迫下适量施氮可提高西瓜根系活力,有效缓解氯盐胁迫,但过量施氮反而会使根系活力增幅降低,对氯盐胁迫的缓解作用下降。同时,在逆境胁迫下,大多数植物体内会产生积累过量丙二醛,从而导致脂质过氧化程度增加^[14],其含量可以反映植物受伤害的程度。图 4, B 显示,随着施氮量的增加,西瓜幼苗根系丙二醛含量先降低后升高,并在 N15 处理下达到最低值;与 N0

对照相比,各施氮处理根系丙二醛含量均不同程度降低,且 N15 和 N20 处理均达到显著水平,降幅为 40.30%和 28.13%。曲线拟合结果表明,氯胁迫下西瓜根系丙二醛含量与施氮水平呈极显著的二次函数关系($r=0.966\ 6^{**}$),当施氮量为 0.15 g/kg 时,根系丙二醛含量最低,过氧化产物最少。说明适量氮素可以有效降低氯盐胁迫下西瓜幼苗根系丙二醛含量,缓解氯盐胁迫对细胞膜的破坏。

2.5 氯盐胁迫下不同氮处理西瓜根系指标的主成分和相关性分析

对 5 个氮处理下西瓜根系 12 个单项指标进行主成分分析,前 2 个主成分的贡献率分别为 69.5%和 11.1%,累计贡献率达 80.6%,说明前 2 个主成分可以代表原来 12 个指标中 80%以上的信息,可以用这 2 个指标概括分析氯盐胁迫下不同氮处理对

西瓜根系的影响。由图 5, A 可知,第一主成分(PC1)中系数较大的是根系分枝数和根系活力,且均与不同氮处理对西瓜根系的影响呈正相关,表明分枝数和根系活力越大,氮对西瓜根系氯盐胁迫的缓解作用越大;第二主成分(PC2)中系数较大的是总根体积和根尖数,且总根体积与氮对西瓜根系的影响呈负相关,根尖数与氮对西瓜根系的缓解作用呈正相关。

同时,由图 5, B 可知,西瓜根系分枝数与总根长、总根表面积、可溶性糖含量、脯氨酸含量、根尖数、根系活力呈正相关,与根系 MDA 含量、平均根系直径、总根体积呈负相关。因此,用根系分枝数和根系活力可初步评价不同氮处理对西瓜根系的影响,而综合评价可用根系分枝数、根系活力、总根体积、根尖数。

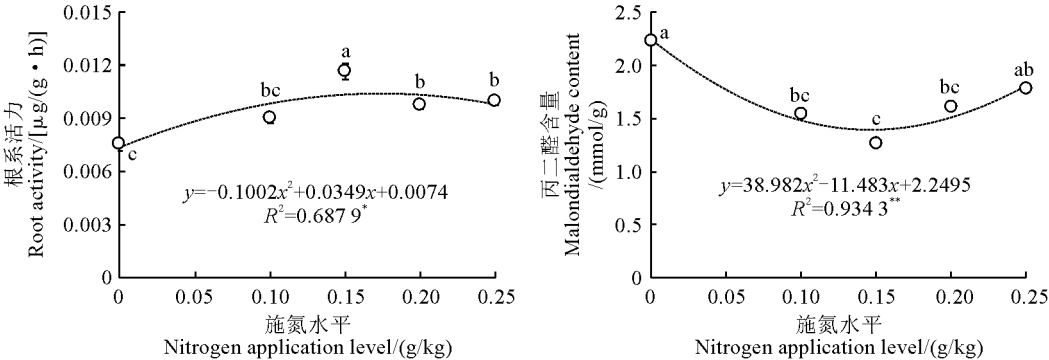
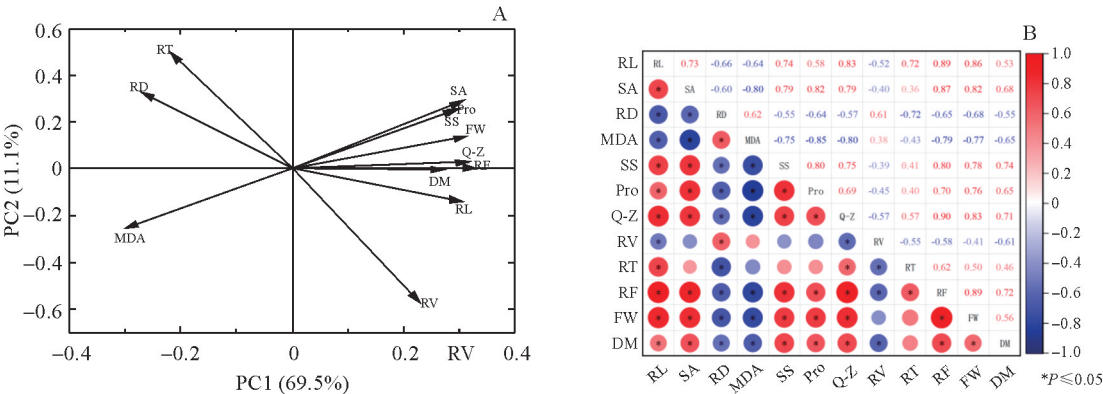


图 4 不同氮水平的西瓜幼苗根系活力
Fig. 4 Root activity of watermelon seedling under different N treatments



RT. 根尖数;RD. 根系总直径;RV. 总根体积;SA. 总根表面积;RL. 总根长;RF. 分枝数;SS. 可溶性糖含量;
Pro. 脯氨酸含量;Q-Z. 根系活力;MDA. 丙二醛含量;FW. 生物量;DM. 干物质量。

图 5 各指标主成分分析(A)和相关性分析(B)

RT. Number of root tips; RD. Total root diameter; RV. Total root volume; SA. Total root surface area; RL. Total root length;
RF. Branching number; SS. Soluble sugar content; Pro. Proline content; Q-Z. Root activity; MDA. Malondialdehyde content;
FW. Biomass; DM. Dry matter.

Fig. 5 Principal component analysis (A) and correlation analysis (B) of indicators

基于成分特征值,可获得 2 个主成分(PC1、PC2)与被测指标间的方程,如式(1),(2):

$$y_1=0.304x_1+0.306x_2-0.269x_3-0.298x_4+0.299x_5+0.292x_3+0.315x_7-0.218x_8+0.229x_9+0.329x_{10}+0.312x_{11}+0.272x_{12} \tag{1}$$

$$y_2=-0.140x_1+0.291x_2+0.326x_3-0.255x_4+0.260x_5+0.255x_6+0.028x_7-0.572x_8+0.494x_9+0.005x_{10}+0.138x_{11}-0.006x_{12} \tag{2}$$

$$F=0.877\times F_1+0.123\times F_2 \tag{3}$$

式中: y_1,y_2 分别为 PC1,PC2; $x_1\sim x_{12}$ 分别为 RL, SA, RD, MDA, SS, Pro, Q-Z, RV, RT, RF, FW, DM; F,F_1,F_2 分别为综合得分,PCA1,PCA2。

以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重,计算主成分综合模型,如式(3)。

根据主成分综合模型即可计算综合主成分值,从表 2 中可以看出不同氮处理对西瓜根系氯胁迫的缓解效果表现为 $N_{15}>N_{20}>N_{10}>N_{25}>N_0$,这与根系生物量和干物质量的表现基本相符。

表 2 综合主成分值

Table 2 Comprehensive principal component analysis (PCA) values

氮处理 N treatment	主成分值 PCA value			排名 Rank
	PCA 1	PCA 2	综合 Comprehensive	
N0	-4.23	-0.75	-4.98	5
N10	-1.90	1.01	-0.89	3
N15	4.18	0.26	4.44	1
N20	1.11	-0.39	0.72	2
N25	-1.25	-0.63	-1.35	4

3 讨 论

3.1 氯盐胁迫下西瓜根系构型对施用氮素的响应特征

盐胁迫时,植株根系最先受到胁迫伤害,使根系生理或形态发生变化,继而影响地上部的生长,导致产量受损^[15]。优化根系是提高作物产量的最可行方式之一^[16],根系作为重要的营养器官,在生长过程中具有自我识别能力,在受到外界环境胁迫时能够首先感知环境变化并且通过主动改变其形态来改变对水分和养分的吸收能力,因此根系发育状态在植物正常生长中起着重要作用^[17-18]。根系构型是

植物根系生长和分枝的结果,它决定了植物吸收和传导养分的能力,包括根系的拓扑结构及不同级别根的长度、直径等^[19],直径小、长度和表面积大、新根尖持续产生的根有益于扩大根系与土壤的接触面积,增加水分和养分的获取^[20]。氮素是作物必需的营养元素之一,其进入植物体的主要途径是根,氮素吸收与根系结构密切相关^[21],施氮能够改变根系形态发育,缓解盐分对作物生长的毒害作用^[22],适量的氮肥会促进根系生长,但过量的氮肥又会抑制根系生长^[23]。研究指出增施氮素可以促进根系生长,表现为根系纤细而表面积增加^[24],进而扩大根系吸收土壤养分的空间^[25],李继光等发现适当提高营养液中的氮素水平能够增加镉胁迫下冬景天的根系总长、总表面积、直径和体积等各项根系形态指标^[26]。本研究表明施氮能够改变西瓜幼苗根系构型,适量施氮会显著增加氯盐胁迫下西瓜根系的根长(RL)、总根表面积(SA)、分枝数(RF)、根尖数(RT),而降低总根系直径(RD)、总根系体积(RV),有助于建立良好的根系结构。这可能是由于施入适量氮素可以促进植物根系伸长及不定根的分化,缓解初级和侧根的生长抑制,根系生长静止阶段部分恢复,根尖重要分生组织的细胞程序性死亡减少^[27]。而根系体积和直径对盐分胁迫下的氮素响应不明显^[28-29],因此施氮会减小根系直径和体积,但不会造成显著影响,研究发现同一物种的根系直径越小,其生理功能越活跃^[30]。

3.2 氯盐胁迫下西瓜根系生理指标对施用氮素的响应特征

盐胁迫对植物的影响主要表现为渗透胁迫、离子毒害、营养失衡或矿质养分亏缺等,进而导致脂膜过氧化,代谢紊乱,使植物正常生长发育受到抑制^[31-32]。氮素是作物生长必需的大量元素,可促进可溶性蛋白和糖的合成,通过提高脯氨酸和可溶性糖等有机渗透调节物质的含量来参与植物体的有机渗透调节,维持作物体内的渗透平衡,减少细胞损失,缓解胁迫过程中植物的衰老,保证作物正常生长^[33-35]。研究发现,适量的氮素能够增加盐胁迫下油菜的有机渗透调节物质累积,缓解盐分对生长的抑制^[36]。李志元等的研究表明,在水分胁迫下,添加氮素可以增加雪菊幼苗的脯氨酸和可溶性糖含量,降低丙二醛含量^[37]。与上述研究结果类似,本研究结果表明施加氮素可以提高氯盐胁迫下西瓜根系中有机渗透调节物质(脯氨酸和可溶性糖)含量,改善渗透胁迫环境,氮素介导的有机溶质累积除有

利于维持组织含水量外,还用于保护光合电子传递来防止氧化损伤,避免膜受到盐诱导的损害^[38],降低根系丙二醛含量,缓解氯盐胁迫对西瓜根系生长的抑制作用,提高根系活力,加强根系对水分和养分的获取,进而提高氯盐胁迫下根系的耐受性,有利于植株在氯盐胁迫下维持正常的生理功能及生长发育,增加根系生物量和干物质。然而,当氮肥施用过量时,氮同化加强,更多氮被用于合成有机化合物,并且氮肥施用量高会增加蔗糖磷酸合酶和磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)羧化酶活性,抑制糖的合成,降低脯氨酸和可溶性糖含量,导致氮素对盐胁迫的缓解效应下降^[39]。

3.3 施氮对西瓜幼苗根系氯盐胁迫缓解效应的综合评价

主成分分析是将多个指标减少为包含 80% 以上全部信息的几个综合指标,因此利用主成分分析进行综合评价的结果会更客观^[40]。杨怡帆等通过主成分分析得出细胞膜透性、MDA 含量、SOD 活性可作为 CaCl₂ 缓解酸枣幼苗地下部 NaCl 胁迫的评

价指标^[41]。谭伟等通过主成分分析指出新梢长度、叶片 CAT 活性、H₂O₂ 含量和 APX 活性可作为不同浓度 NaCl 胁迫对葡萄影响的综合评价指标,且 10 mmol/L CaCl₂ 是缓解葡萄 NaCl 胁迫的最适浓度^[42-43]。本试验结果表明,根系的分枝数、根系活力、总根体积和根尖数可作为氮素调控西瓜氯盐胁迫的综合指标,且土壤施氮量为 0.14~0.17 g/kg 时对西瓜根系氯盐胁迫的缓解效果最佳。

4 结 论

适量施氮可通过减少西瓜根系直径和体积来增加根长、根表面积、分枝数、根尖数,建立良好的根系构型,并通过增加渗透调节物质(可溶性糖和脯氨酸)含量和减少膜氧化损伤,来维持较高的根系活力,从而抵御氯盐胁迫影响,保障西瓜根系正常生长发育。在本试验条件下,氯盐胁迫下的适宜施氮量为 0.14~0.17 g/kg 干土。西瓜根系的分枝数、根系活力、总根体积、根尖数等指标可综合评价施氮对氯盐胁迫伤害的缓解效应。

参考文献:

[1] 杨传杰, 罗毅, 孙林, 等. 水分胁迫对覆膜滴灌棉花根系活力和叶片生理的影响[J]. 干旱区研究, 2012, **29**(5): 802-810.
YANG C J, LUO Y, SUN L, *et al.* Effect of water stress on root vigor and leaf physiology of cotton under mulch drip irrigation[J]. *Arid Zone Research*, 2012, **29**(5): 802-810.

[2] RANJAN A, SINHA R, SINGLA-PAREEK S L, *et al.* Shaping the root system architecture in plants for adaptation to drought stress [J]. *Physiologia Plantarum*, 2022, **174**(2): e13651.

[3] SHAHID M A, SARKHOSH A, KHAN N, *et al.* Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development [J]. *Agronomy*, 2020, **10**(7): 938.

[4] GUO, J. S, ZHOU, Q, LI X. J., *et al.* Enhancing NO₃⁻ supply confers NaCl tolerance by adjusting Cl⁻ uptake and transport in *Glycine max* & *Glycine soja*[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutritio*, 2017, **17**: 194-204.

[5] KHANNA RR, JAHAN B, IQBAL N, *et al.* GABA reverses salt-inhibited photosynthetic and growth responses through its influence on NO-mediated nitrogen-sulfur assimilation and antioxidant system in wheat [J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, **325**: 73-82.

[6] 魏照清, 田里, 谭军利, 等. 压砂地微咸水利用现状及氯离子危害的缓解措施[J]. 新农业, 2021(18): 42-43.

WEI Z Q, TIAN L, TAN J L, *et al.* Utilization status of brackish water in sand-pressing land and slow control measures of chloride ion harm [J]. *Modern Agriculture*, 2021(18): 42-43.

[7] TIAN T, WANG J, WANG H, *et al.* Nitrogen application alleviates salt stress by enhancing osmotic balance, ROS scavenging, and photosynthesis of rapeseed seedlings (*Brassica napus*) [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2022, **17**(1): 2 081 419.

[8] NEMAT-ALLA M M, HASSAN N M. Nitrogen alleviates NaCl toxicity in maize seedlings by regulating photosynthetic activity and ROS homeostasis[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2020, **42**(6): 93.

[9] 张佳群, 王西娜, 谭军利, 等. 施氮量对滴灌压砂西瓜生长产量及品质的影响[J]. 农业科学研究, 2019, **40**(2): 22-28.
ZHANG J Q, WANG X N, TAN J L, *et al.* Effects of nitrogen application rate on growth, yield and quality of watermelon in gravel-mulched field under drip irrigation[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2019, **40**(2): 22-28.

[10] 高博文, 孙德玺, 刘君璞, 等. 盐胁迫对西瓜幼苗生理生化特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, **35**(8): 35-41.
GAO B W, SUN D X, LIU J P, *et al.* Salt stress affects physiological and biochemical characteristics of water-melon seedlings[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, **35**(8): 35-41.

[11] TAVAKKOLI E, RENGASAMY P, MCDONALD G K.

- High concentrations of Na^+ and Cl^- ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, **61**(15): 4 449-4 459.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 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.
- [14] 龚远博, 胡吉怀, 胡丁猛, 等. 丛枝菌根真菌对盐碱胁迫下杜梨幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(8): 1 320-1 329.
GONG Y B, HU J H, HU D M, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological traits of *Pyrus betulifolia* under salt-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(8): 1 320-1 329.
- [15] 童 辉, 孙 锦, 郭世荣, 等. 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗根系形态及活力的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, **35**(3): 37-41.
TONG H, SUN J, GUO S R, *et al.* Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on root morphology and activity of cucumber seedlings[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, **35**(3): 37-41.
- [16] 冯 雷, 徐万里, 唐光木, 等. 生物炭配施氮素对陆地棉盛花期根系形态与构型的影响[J]. 农业机械学报, 2019, **50**(3): 241-249.
FENG L, XU W L, TANG G M, *et al.* Effects of biochar combined with nitrogen on root morphology and system architecture during *Gossypium hirsutum* L. fullbloom stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(3): 241-249.
- [17] 高文童, 张春艳, 董廷发, 等. 丛枝菌根真菌对不同性别组合模式下青杨雌雄植株根系生长的影响[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(1): 37-45.
GAO W T, ZHANG C Y, DONG Y F, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the root growth of male and female *Populus cathayana* individuals grown under different sexual combination patterns[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(1): 37-45.
- [18] 朱晋宇, 惠 放, 李 苗, 等. 氮水平对盆栽沙培番茄苗期根系三维构型与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(23): 131-137.
ZHU J Y, HUI F, LI M, *et al.* Effect of different nitrogen concentrations on roots architecture and nitrogen use efficiency in potting tomato seedling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(23): 131-137.
- [19] 毛齐正. 切根对侧柏幼苗根构型的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008.
- [20] KIM Y, CHUNG YS, LEE E, *et al.* Root response to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, **21**(4): 1 513.
- [21] WANG J, DUN X L, SHI J Q, *et al.* Genetic dissection of root morphological traits related to nitrogen use efficiency in *Brassica napus* L. under two contrasting nitrogen conditions[J]. *Frontiers Plant Science*, 2017, **8**: 1 709.
- [22] GÓMEZ I, PEDREÑO J N, MORAL R, *et al.* Salinity and nitrogen fertilization affecting the macronutrient content and yield of sweet pepper plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, **19**(2): 353-359.
- [23] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(6): 1 069-1 073.
WANG S Q, HAN X Z, QIAO Y F, *et al.* Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(6): 1 069-1 073.
- [24] 史正军, 樊小林. 作物对氮素养分高效吸收的根系形态学研究进展[J]. 广西农业生物科学, 2003, **22**(3): 225-229.
SHI Z J, FAN X L. Progress in root morphology for nitrogen efficient acquisitions in crop[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2003, **22**(3): 225-229.
- [25] 许峻模, 潘 婷, 龙佳峰, 等. 施氮及不同根系分隔模式对尾叶桉和降香黄檀幼苗生长及叶片生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(6): 1 128-1 137.
XU J M, PAN T, LONG J F, *et al.* Effect of nitrogen application on the growth and leaf physiological traits of *Eucalyptus urophylla* and *Dalbergia odorifera* seedlings under different root partitioning patterns[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(6): 1 128-1 137.
- [26] 李继光, 朱 恩, 李廷强, 等. 氮对镉胁迫下东南景天根系形态及镉积累的影响[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(4): 271-275.
LI J G, ZHU E, LI Y Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on biomass, root morphology and Cd accumulation of Cd-stressed *Sedum alfredii* Hance. species[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2007, **29**(4): 271-275.
- [27] KARLOVA R, BOER D, HAYES S, *et al.* Root plasticity under abiotic stress[J]. *Plant Physiology*, 2021, **187**(3): 1 057-1 070.
- [28] 韩颜隆, 刘晓静, 王 静, 等. 施氮对不同品种紫花苜蓿根系特性和生产性能的影响[J]. 草地学报, 2022, **30**(2): 379-384.
HAN Y L, LIU X J, WANG J, *et al.* Effects of nitrogen application on root characteristics and productivity of different alfalfa cultivars[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, **30**(2): 379-384.
- [29] 原俊凤, 田长彦, 冯 固, 等. 硝态氮对盐胁迫下囊果碱蓬幼苗根系生长和耐盐性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(4): 953-959.
YUAN J F, TIAN C Y, FENG G, *et al.* Effects of nitrate on the root growth and salt tolerance of *Suaeda physophora* seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, **15**(4): 953-959.

[30] 应益山, 杨丽婷, 程建新, 等. 不同生境对苦竹鞭根形态结构及其异速生长的影响[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(9): 1 583-1 590.
YING Y S, YANG L T, CHENG J X, *et al.* Effect of habitats on the morphological and structural characteristic of rhizome roots of *Pleiolblastus amarus* and its allometric growth[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(9): 1 583-1 590.

[31] 廖 岩, 彭友贵, 陈桂珠. 植物耐盐性机理研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(5): 2 077-2 089.
LIAO Y, PENG Y G, CHEN G Z. Research advances in plant salt-tolerance mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(5): 2 077-2 089.

[32] 付 豪, 任 云, 陈泽雄, 等. 低铁胁迫对不同铁效率玉米幼苗生长、抗氧化及光合生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2022, **30**(10): 1 620-1 629.
FU H, REN Y, CHEN Z X, *et al.* Effects of low iron stress on growth, antioxidant, and photosynthetic physiological characteristics of maize cultivar with contrast iron efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(10): 1 620-1 629.

[33] 王 辉, 王庆贵. 氮添加对早春植物生长的影响研究进展[J]. 世界生态学, 2021, **10**(3): 404-414.
WANG H, WANG Q Q. Effect of nitrogen addition on plant growth in early spring: A review[J]. *International Journal of Ecology*, 2021, **10**(3): 404-414.

[34] SIKDER R K, WANG X R, ZHANG H H, *et al.* Nitrogen enhances salt tolerance by modulating the antioxidant defense system and osmoregulation substance content in *Gossypium hirsutum*[J]. *Plants*, 2020, **9**(4): 450.

[35] 陈泽平, 史晓敏, 王 瑞, 等. 盐胁迫下不同葡萄砧木的渗透调节及抗氧化能力[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(11): 1 880-1 891.
CHEN Z P, SHI X M, WANG R, *et al.* Osmotic regulation and antioxidant capacity of different grapevine rootstocks under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(11): 1 880-1 891.

[36] 田 甜, 王海江, 王金刚, 等. 盐胁迫下施加氮素对饲用油菜有机渗透调节物质积累的影响[J]. 草业学报, 2021, **30**(10): 125-136.
TIAN T, WANG H J, WANG J G, *et al.* Effects of nitrogen application on accumulation of organic osmotic regulating substances in forage rapeseed (*Brassica napus*) under salt stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(10): 125-136.

[37] 李志元, 江 虹, 王亚楠, 等. 施氮与水分胁迫对雪菊幼苗生长及生理的影响[J]. 新疆农业科学, 2020, **57**(1): 127-138.
LI Z Y, JIANG H, WANG Y N, *et al.* Effects of water stress and nitrogen application on growth and physiology of *Coreopsis tinctoria* seedlings[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2020, **57**(1): 127-138.

[38] KHAN M I R, AGHER M, KHAN N A. Alleviation of salt-induced photosynthesis and growth inhibition by salicylic acid involves glycinebetaine and ethylene in mungbean (*Vigna radiata* L.)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2014, **80**: 67-74.

[39] MADHULIKA, SINGH, *et al.* Responses of photosynthesis, nitrogen and proline metabolism to salinity stress in *Solanum lycopersicum* under different levels of nitrogen supplementation[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2016, **109**: 72-83.

[40] 张志恒, 王玉琴, 任国艳, 等. 基于主成分分析和隶属函数分析评价不同添加剂处理的玉米秸秆青贮的发酵品质[J]. 动物营养学报, 2022, **34**(4): 2 677-2 688
ZHANG Z H, WANG Y Q, REN G Y, *et al.* Evaluation of fermentation quality of corn straw silage treated with different additives based on principal component analysis and membership function analysis[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, **34**(4): 2 677-2 688.

[41] 杨怡帆, 吕新民, 鲁晓燕, 等. CaCl₂ 缓解酸枣幼苗 NaCl 胁迫的主成分分析[J]. 果树学报, 2016, **33**(8): 959-968.
YANG Y F, LÜ X M, LU X Y, *et al.* Principal component analysis of the alleviating effects of CaCl₂ on NaCl stress in sour jujube (*Ziziphus acidojujuba*) seedlings[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, **33**(8): 959-968.

[42] 谭 伟, 李晓梅, 董志刚, 等. 不同浓度 NaCl 对‘达米娜’葡萄影响的主成分分析[J]. 农学报, 2017, **7**(9): 42-47.
TAN W, LI X M, DONG Z G, *et al.* Principal component analysis of the effect of different NaCl concentrations on ‘Tamina’ grape seedlings[J]. *Journal of Agriculture*, 2017, **7**(9): 42-47.

[43] 谭 伟, 李晓梅, 董志刚, 等. 主成分分析不同浓度 CaCl₂ 对 NaCl 胁迫下‘达米娜’葡萄的缓解效应[J]. 植物生理学报, 2018, **54**(4): 574-580.
TAN W, LI X M, DONG Z G, *et al.* Principal component analysis on the alleviating effects of different concentrations of CaCl₂ on ‘Tamina’ grape under NaCl stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, **54**(4): 574-580.

(编辑:裴阿卫)