

模拟土壤酸化和盐胁迫对姜矿质元素及渗透物质含量的影响

尹丰满, 曹逼力, 徐坤*

山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 农业部黄淮地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 山东泰安271018

摘要: 为探讨土壤酸化与盐渍化对姜生长的影响, 本文采用盆栽砂培方式, 通过调节Hoagland营养液pH (6.0、4.0)及 Na^+ (0、100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)水平, 模拟土壤酸化与盐胁迫环境, 研究了酸、盐交互处理条件下姜植株各器官生长量、矿质元素(Na、K、Ca、Mg)含量和叶片渗透物质含量等的变化。结果表明, 酸胁迫仅影响了姜地上茎叶的生长量, 盐胁迫则显著抑制了姜地上及地下各器官的生长, 但盐胁迫条件下较低的pH促进了姜植株的生长。盐胁迫可显著提高姜叶片中可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸等渗透物质含量, 增强脯氨酸合成相关酶 $\Delta 1$ -吡咯啉-5-羧酸合成酶(P5CS)和鸟氨酸转氨酶(OAT)活性, 降低脯氨酸脱氢酶(ProDH)活性; 但酸胁迫对渗透物质含量及P5CS、OAT和ProDH活性影响较小。盐胁迫条件下, 姜各器官Na含量显著增加, K、Ca及Mg含量显著降低; 酸胁迫则对相关离子含量无显著影响, 但盐胁迫下较低的pH可以降低姜各器官Na含量, 促进K、Ca及Mg等离子吸收, 有利于维持离子渗透平衡, 减轻盐胁迫对细胞膜的损伤。

关键词: 姜; 盐胁迫; 酸化; 矿质元素; 渗透物质

土壤酸化和盐渍化是限制植物生长和农业发展的重要环境因素(Nawar等2015)。据报道, 我国盐渍地面积有 $9.9\times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中盐渍化耕地为 $9.2\times 10^6 \text{ hm}^2$, 主要分布在东北、西北、华北以及沿海地区等(Ci和Yang 2010)。通过土地调查发现, 我国耕地出现酸化的土壤占我国耕地总面积的90%以上, 且酸化程度在不断加重(Guo等2010)。土壤盐渍化和土壤酸化往往伴随出现, 土壤盐分的积累增强了潜酸向活性酸的转化, 影响程度随盐分的积累而增加, 过量施用化肥引起的盐积累也可在一定程度上进一步降低土壤的pH值(倪中应等2017)。土壤盐渍化和土壤酸化会引起植物一系列的生理生化变化, 如改变细胞质膜的结构和功能、影响质膜的通透性、产生渗透胁迫和离子毒害效应等, 进而减少矿质元素的吸收, 降低植株生长速率和生物量。

矿质元素是植物细胞结构或新陈代谢的基本组成成分, 对植物的生长、发育起着重要作用(Singh等2013)。土壤盐渍化环境对植株的伤害方式是植株细胞内积累了大量的 Na^+ , 使植株产生离子毒害并降低矿质元素吸收。研究表明, 盐胁迫不仅抑制了植物对K、Ca、Mg、P等大量元素的吸收, 同时限制了对Cu、Fe、Mn、Zn等微量元素的吸收, 导致植物体内营养元素缺乏以及细胞内代谢紊乱(Tavakkoli等2011)。土壤的酸化不仅会降低某些

矿质营养的有效性, 同时也会使土壤矿质营养易于淋失, 降低土壤保持养分的能力。

姜(*Zingiber officinale*)是姜科多年生草本植物, 是集调味品、食品加工原料和药用为一体的高效多用途蔬菜, 是我国主要特色出口蔬菜之一。近年来, 某些姜主产区随种植年限增加, 土壤盐渍化及酸化现象普遍发生。通过对山东主产区姜田土壤分析发现, 姜田含盐量平均在0.22%~0.36%, 高者可达0.56%, 土壤pH最低达4.61, 严重影响了姜的产量, 制约了姜产业的可持续发展。为进一步明确土壤酸化与盐交互胁迫对姜生长的影响, 本试验采用砂培法, 研究酸、盐交互胁迫下姜植株不同器官Na、K、Ca、Mg矿质元素含量及姜叶片渗透物质的变化, 探讨根系对土壤中离子的吸收及离子在姜各器官间的运输和分布情况, 以期深入了解姜植株的耐酸和耐盐机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2017年在山东农业大学园艺试验站进

收稿 2019-03-22 修定 2019-05-08

资助 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-A-09)和山东省“双一流”学科建设项目(SYL2017YSTD06)。

* 通讯作者(xukun@sdau.edu.cn)。

行。供试姜(*Zingiber officinale* Rosc.)品种为‘山农1号’, 4月5日将催芽种姜播种于直径25 cm、高30 cm的陶盆中, 采用砂培, 每盆播种1株, 播种后浇灌Hoagland营养液进行培养, 直至收获。试验根据营养液pH和Na⁺浓度不同设4个处理, 分别为CK (pH=6.0)、T1 (pH=4.0)、T2 (pH=6.0, Na⁺=100 mmol·L⁻¹)和T3 (pH=4.0, Na⁺=100 mmol·L⁻¹), 营养液pH以0.05 mmol·L⁻¹的HCl进行调节, Na⁺浓度以添加等量的NaCl和Na₂SO₄调节。试验过程中, 每隔20 d左右浇灌1次纯净水进行洗盐处理, 分别在姜幼苗期(7月15日)、发棵期(8月18日)及根茎膨大期(9月21日)取样, 测定相关指标。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生长量

每小区随机取5株, 样品洗净沥干后, 分别测定根、茎、根茎、叶片鲜重, 之后置于烘箱中105°C杀青20 min, 75°C烘干至恒重, 用于测定矿质元素。

1.2.2 钠(Na)、钾(K)含量测定

Na和K含量采用火焰分光光度方法测定(赵世杰和苍晶2016)。

1.2.3 钙(Ca)和镁(Mg)含量测定

Ca和Mg含量采用微波消解方法进行消煮, 用等离子发射体光谱仪(iCAP7000, ThermoFisher, 美国)测定。

1.2.4 脯氨酸相关代谢酶测定

Δ1-吡咯啉-5-羧酸合成酶(Δ1-pyrroline-5-carboxylatesynthetase, P5CS)活性采用Silva-Ortega等(2008)方法测定。脯氨酸脱氢酶(prolinedehydrogenase, ProDH)活性采用Ruiz等(2002)方法测定。鸟氨酸转氨酶(ornithineaminotransferase, OAT)活性采用Ruiter和Kolloffel (1983)方法测定。

1.2.5 渗透物质的测定

可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250法(赵世杰和苍晶2016)测定。脯氨酸和可溶性糖含量采用磺基水杨酸法和蒽酮法(赵世杰和苍晶2016)方法测定。

1.3 数据处理

采用Excel和DPS软件进行数据处理和统计分析, Duncan新复极差法进行差异显著性检验。

2 实验结果

2.1 模拟土壤酸化和盐胁迫对姜生物量的影响

分析各处理条件下姜在根茎膨大期的生长情况(表1)可知, T2、T3处理姜叶、茎、根和根茎的鲜重均较CK显著下降, 而T1仅影响了姜叶片和茎的生长, 对根及根茎无显著影响。相比CK, T2姜叶、茎、根和根茎的鲜重分别降低了52.11%、51.69%、55.18%和62.59%, 而T3处理的姜植株上述指标仅分别下降了41.64%、39.06%、42.69%和46.16%。盐胁迫显著抑制姜的生长, 但在较低pH值条件下姜受到的抑制程度减轻, 说明较低pH可以缓解盐胁迫对姜生长的影响。

2.2 模拟土壤酸化和盐胁迫对姜叶片渗透物质的影响

2.2.1 对姜叶片可溶性糖和可溶性蛋白的影响

从图1知, T1处理姜叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量均随生长的进行呈升高的趋势, 且在幼苗期和发棵期, T1显著高于CK, 而至根茎膨大期则与CK无显著差异; T2和T3处理姜叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量呈先增加后降低的趋势, 在发棵期达最大值, 分别为34.55、33.30 mg·g⁻¹ (FW)和12.27、13.99 mg·g⁻¹ (FW), 分别较CK增加了191.68%、181.09%和26.09%、43.78%。

2.2.2 对姜叶片脯氨酸代谢的影响

图2显示, 各胁迫处理姜叶片P5CS、OAT的活性及脯氨酸含量均显著高于CK, 且均随胁迫时间的延长呈先上升后下降的趋势, 在发棵期达最大值时, T1、T2、T3的P5CS和OAT活性分别较CK提高了26.52%、165.83%、189.83%和22.28%、122.28%、153.85%, 脯氨酸含量分别增加了21.06%、80.01%、99.93%。ProDH活性的变化不同于上述指标, 全生育期均以CK较高, T1次之, T2、T3较低, 如发棵期T1、T2、T3分别较CK降低了12.81%、67.10%、69.90%。

2.3 模拟土壤酸化和盐胁迫对姜不同器官矿质元素含量的影响

2.3.1 对姜不同器官钠和钾含量的影响

表2显示, 不同处理姜各器官Na含量均随生长的进行呈增加的趋势, 但处理间存在显著差异, 均

表1 土壤酸化和盐胁迫对姜生物量的影响

Table 1 Effect of acid and salt stress on the biomass of ginger

处理	叶鲜重/g	茎鲜重/g	根鲜重/g	根茎鲜重/g
CK	146.60±1.64 ^a	298.33±1.53 ^a	77.77±0.38 ^a	305.51±5.03 ^a
T1	140.42±0.75 ^b	289.00±5.00 ^b	76.37±0.95 ^b	296.27±6.18 ^a
T2	70.20±0.58 ^d	144.13±2.25 ^d	34.86±0.71 ^c	114.30±7.95 ^c
T3	85.55±1.06 ^c	181.81±1.79 ^c	44.57±0.85 ^b	164.50±7.24 ^b

同列数据后不同小写字母表示差异达5%显著水平, 下表同此。

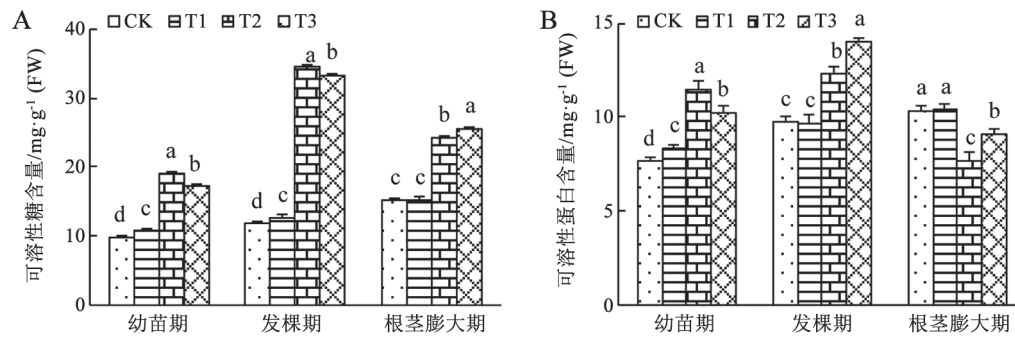


图1 土壤酸化和盐胁迫对姜叶片可溶性糖和可溶性蛋白的影响

Fig.1 Effects of acid and salt stress on soluble sugar and soluble protein in ginger leaves

图中不同的小写字母表示同一生长期不同处理间差异达5%显著水平, 下图同此。

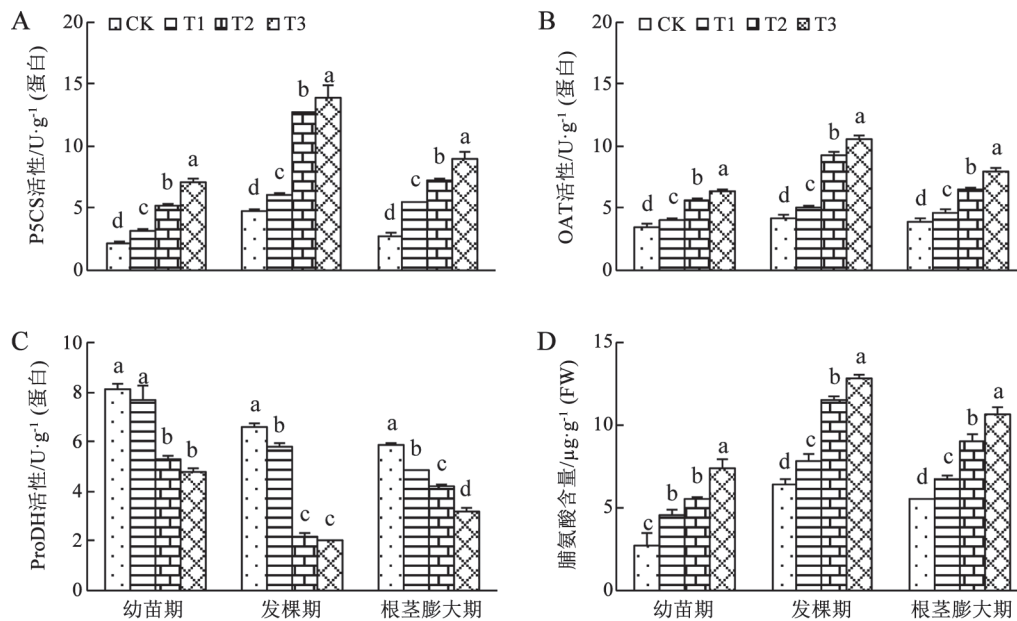


图2 土壤酸化和盐胁迫对姜叶片脯氨酸代谢的影响

Fig.2 Effects of acid and salt stress on proline metabolism in ginger leaves

表2 土壤酸化和盐胁迫下姜各器官中Na和K的含量

Table 2 Na and K content in different organs of ginger under acid and salt stress

器官	处理	Na含量/mg·g ⁻¹ (DW)			K含量/mg·g ⁻¹ (DW)		
		幼苗期	发棵期	根茎膨大期	幼苗期	发棵期	根茎膨大期
根	CK	6.81±0.28 ^c	8.78±0.28 ^c	10.09±0.28 ^c	25.39±0.67 ^a	31.57±1.16 ^a	27.32±0.67 ^a
	T1	7.14±0.28 ^c	9.43±0.49 ^c	10.91±0.49 ^c	23.45±1.16 ^b	26.93±1.16 ^b	25.00±0.67 ^b
	T2	16.49±1.36 ^a	23.72±0.49 ^a	30.12±0.49 ^a	16.88±0.67 ^d	15.33±1.16 ^d	9.92±0.67 ^d
	T3	10.50±0.38 ^b	18.30±0.49 ^b	24.70±0.49 ^b	19.20±0.67 ^c	19.97±1.16 ^c	13.01±1.16 ^c
叶	CK	5.66±0.28 ^c	7.96±0.49 ^c	8.61±0.28 ^c	31.18±0.67 ^a	36.60±0.67 ^a	31.96±0.67 ^a
	T1	5.82±0.28 ^c	7.14±0.28 ^c	8.78±0.28 ^c	28.09±1.16 ^b	34.66±0.67 ^b	30.80±0.67 ^a
	T2	11.40±0.49 ^a	17.31±0.49 ^a	23.06±0.75 ^a	20.68±0.67 ^d	17.20±0.67 ^d	12.24±0.67 ^c
	T3	7.96±0.49 ^b	14.03±0.75 ^b	18.96±0.75 ^b	25.77±1.16 ^c	23.45±1.16 ^c	16.11±0.67 ^b
根茎	CK	6.31±0.28 ^c	7.63±0.28 ^d	9.27±0.28 ^c	26.55±0.67 ^a	35.05±1.16 ^a	43.17±1.16 ^a
	T1	6.15±0.28 ^c	8.61±0.28 ^c	8.61±0.28 ^c	25.00±0.67 ^b	33.50±0.67 ^b	41.24±0.67 ^a
	T2	13.05±0.28 ^a	20.76±0.49 ^a	25.69±0.49 ^a	18.04±0.67 ^d	17.27±0.67 ^d	12.24±0.67 ^c
	T3	9.43±0.49 ^b	15.84±0.49 ^b	20.93±0.75 ^b	20.75±0.67 ^c	22.87±0.58 ^c	19.59±1.77 ^b

以T2较高, T3次之, T1和CK较低, 如根茎膨大期T2、T3姜根茎Na含量分别较CK增加了177.13%和125.78%; 不同时期姜各器官Na含量均表现为根>根茎>叶。在整个生长期, T3各器官Na含量显著低于T2, 且二者均显著高于CK, 但T1与CK无显著差异。

不同处理姜各器官K含量的变化与Na显著不同, 全生育期内T2、T3各器官K含量显著低于CK, 且基本上随生长的进行逐渐降低; 而T1各器官K含量虽然也显著低于CK, 但降幅较小。如发棵期

T1、T2、T3姜根茎K含量较CK分别降低了4.42%、50.73%、34.75%; T3叶片和根K含量比T2则分别提高了36.34%和30.27%。

2.3.2 对姜不同器官钙和镁含量的影响

由表3知, 姜各器官Ca含量均表现为叶>根茎>根, 且随生长的进行呈降低的趋势。T2、T3姜各器官中Ca含量均随胁迫时间的延长而逐渐降低, 且以T2降幅较大; T1姜各器官Ca含量均显著高于T2、T3, 但根系Ca含量与CK无显著差异, 叶片及根茎Ca含量则显著低于CK。不同处理姜各器官

表3 土壤酸化和盐胁迫下姜各器官中Ca和Mg的含量

Table 3 Ca and Mg content in different organs of ginger under acid and salt stress

器官	处理	Ca含量/mg·g ⁻¹ (DW)			Mg含量/mg·g ⁻¹ (DW)		
		幼苗期	发棵期	根茎膨大期	幼苗期	发棵期	根茎膨大期
根	CK	11.16±0.85 ^a	13.86±0.41 ^a	14.38±0.18 ^a	11.38±0.04 ^a	9.09±0.03 ^a	8.91±0.31 ^a
	T1	10.92±0.22 ^a	13.72±0.36 ^a	14.27±0.31 ^a	10.94±0.03 ^b	8.87±0.07 ^b	8.53±0.13 ^b
	T2	7.83±0.19 ^b	5.85±0.08 ^c	4.76±0.37 ^c	6.35±0.04 ^d	4.43±0.14 ^d	3.21±0.08 ^d
	T3	8.50±0.06 ^b	7.50±0.51 ^b	6.79±0.38 ^b	7.11±0.02 ^c	5.34±0.05 ^c	4.24±0.08 ^c
叶	CK	19.45±0.11 ^a	20.12±0.19 ^a	20.31±0.33 ^a	12.93±0.07 ^b	14.37±0.14 ^b	12.64±0.03 ^a
	T1	18.85±0.09 ^b	19.56±0.07 ^b	20.08±0.14 ^a	15.03±0.39 ^a	15.31±0.08 ^a	11.47±0.24 ^b
	T2	13.99±0.16 ^d	11.18±0.17 ^d	8.29±0.24 ^c	8.73±0.24 ^c	6.87±0.05 ^d	4.58±0.03 ^d
	T3	16.77±0.12 ^c	14.35±0.25 ^c	12.26±0.2 ^b	9.18±0.15 ^c	7.28±0.13 ^c	6.27±0.08 ^c
根茎	CK	14.18±0.88 ^a	16.36±0.09 ^a	15.01±0.38 ^a	9.05±0.04 ^b	8.86±0.07 ^a	7.04±0.12 ^a
	T1	12.97±0.15 ^b	15.10±0.53 ^b	13.95±0.66 ^b	10.06±0.11 ^a	8.39±0.11 ^b	6.90±0.07 ^a
	T2	7.28±0.27 ^d	6.27±0.08 ^d	5.38±0.14 ^d	7.24±0.02 ^d	5.52±0.12 ^d	4.58±0.03 ^c
	T3	10.21±0.27 ^c	8.10±0.07 ^c	6.99±0.26 ^c	7.95±0.19 ^c	6.42±0.03 ^c	4.99±0.06 ^b

Mg含量与Ca含量变化基本一致(表3),亦即在整个生长期, T2、T3各器官Mg含量均较CK显著降低,但T3显著高于T2,而T1与CK则因不同生育期、不同器官互有高低。说明盐胁迫显著抑制了姜对Ca、Mg的吸收,而较低的pH值能促进盐胁迫下姜对Ca、Mg吸收及利用,从而提高其含量。

3 讨论

生长量是植株对胁迫响应的直观体现。盐胁迫可降低植株各器官的生物量,抑制植株的生长发育(李艳迪等2018; Zhang等2018)。本研究发现,单一的酸胁迫仅影响了姜茎、叶的生物量,而盐胁迫则显著降低了姜根、根茎、茎及叶的生物量,但酸盐交互处理下姜植株各器官生物量高于单一盐处理,表明较低pH可以缓解盐胁迫对姜植株胁迫影响。

胁迫条件下,植物体内会合成和积累一些无毒的无机和有机渗透调节物质,以降低细胞渗透势,维持正常生理代谢(Yin等2013)。研究发现,NaCl胁迫下的小金海棠(*Malus xiaojinensis*) (徐臣善2014)和北美豆梨(*Pyrus calleryana*) (赵佳伟等2019)可溶性蛋白含量显著高于对照,而酸雨胁迫条件下,小麦(*Triticum aestivum*)叶片可溶性蛋白质含量随酸雨酸度的增强而降低(麦博儒等2008)。本研究发现,较低pH和盐胁迫条件下,姜叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量均增加,且在酸与盐交互处理下含量最高。脯氨酸作为一种重要的有机渗透调节物质,对缓解逆境胁迫有重要作用。植物中脯氨酸合成主要有两条途径, Δ^1 -吡咯啉-5-羧酸合成酶(P5CS)是谷氨酸途径的核心生物合成酶,鸟氨酸氨基转移酶(OAT)是鸟氨酸途径的核心生物合成酶,而脯氨酸脱氢酶(ProDH)是脯氨酸分解代谢的主要限速酶。本研究发现,较低pH和盐胁迫提高了姜叶片P5CS和OAT活性,降低了ProDH活性,有利于脯氨酸的积累,缓解盐胁迫对细胞的损伤。

盐胁迫会破坏植株体内的离子平衡,引起植株体内Na含量增加,而将离子区隔到不同组织和细胞是维持体内离子平衡的主要途径之一(Peng等2016)。不同植株的离子区域化方式不同,例如,小

麦(Zou等2018)等优先将Na积累在根中;西伯利亚白刺(*Nitraria sibirica*) (李焕勇等2017)则优先将Na积累在叶中;小型西瓜(*Citrullus lanatus*) (韩志平等2010)的Na主要在根部和茎部积累。本研究发现,姜根、根茎和叶中Na含量在盐胁迫下显著增加,主要以根中含量最高;但酸与盐交互胁迫下,姜各器官Na含量均低于单一盐处理,这可能与较低pH能提高细胞跨膜的电化学势,有利于推动 Na^+/H^+ 反向转运蛋白将 Na^+ 排出有关(Zhang等2008)。

K作为植物正常代谢的必需元素,提高其在植物体内含量有利于维持细胞离子平衡,在植物对逆境的适应中起着重要作用(Gratten和Grieve 1992)。本研究发现盐胁迫显著降低了姜各器官K含量,且随胁迫时间延长而加重,这可能是Na和K具有相似的离子半径和水合能,Na会竞争K吸收位点,导致K吸收受阻;适度酸化与盐交互胁迫条件下,姜各器官K含量高于单一盐胁迫处理,这可能与高浓度 H^+ 促使液泡膜 H^+ -ATPase水解提供离子跨膜转运动力,降低了细胞内Na含量有关。Ca和Mg可以维持生物膜结构的稳定,对保持细胞完整性有重要作用。有研究发现,盐胁迫可抑制花生(*Arachis hypogaea*)各器官对K、Ca和Mg元素的吸收积累(史晓龙等2018),此外随着土壤pH值的降低,柚树(*Citrus grandis*)中Ca和Mg的含量减少(周高峰等2018)。本研究中盐胁迫抑制了姜对Ca和Mg的吸收,降低了各器官Ca和Mg含量;而在相同盐浓度条件下,较低pH处理显著提高了姜各器官Ca和Mg含量,说明适度酸化可以增强盐胁迫下姜对Ca和Mg的吸收,这可能与 H^+ 降低了细胞中Na含量有关。

参考文献(References)

- Ci LJ, Yang XH (2010). Desertification and Its Control in China. Beijing: Higher Education Press
- Gratten SR, Grieve CM (1992). Mineral element acquisition and growth response of plant grown in saline environments. *Agr Ecosyst Environ*, 38: 275–300
- Guo JH, Liu XJ, Zhang Y (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327: 1008–1010
- Han ZP, Guo SR, You XN, et al (2010). Metabolism of reactive oxygen species and contents of osmotic substances in watermelon seedlings under salinity stress. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 30: 2210–2218 (in Chinese with

- English abstract) [韩志平, 郭世荣, 尤秀娜等(2010). 盐胁迫对西瓜幼苗活性氧代谢和渗透调节物质含量的影响. 西北植物学报, 30: 2210–2218]
- Li HY, Tang XQ, Yang XY, et al (2017). Effects of NaCl stress on mineral element contents in *Nitraria sibirica* seedlings. *Plant Physiol J*, 53: 2125–2136 (in Chinese with English abstract) [李焕勇, 唐晓倩, 杨秀艳等(2017). NaCl处理对西伯利亚白刺幼苗中矿质元素含量的影响. 植物生理学报, 53: 2125–2136]
- Li YD, Guo JR, Wang BS (2018). Effects of sodium salt and chloride on vegetative growth of euhalophyte *Suaeda salsa*. *Plant Physiol J*, 54: 421–428 (in Chinese with English abstract) [李艳迪, 郭建荣, 王宝山(2018). 钠盐和氯化物对真盐生植物盐地碱蓬营养生长的影响. 植物生理学报, 54: 421–428]
- Mai BR, Zheng YF, Liang J, et al (2008). Effects of simulated acid rain on leaf photosynthate, growth, and yield of wheat. *J Appl Ecol*, (10): 2227–2233 (in Chinese with English abstract) [麦博儒, 郑有飞, 梁骏等(2008). 模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响. 应用生态学报, (10): 2227–2233]
- Nawar S, Buddenbaum H, Hill J (2015). Estimation of soil salinity using three quantitative methods based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy: a case study from Egypt. *Arab J Geosci*, 8: 5127–5140
- Ni ZY, Shi YJ, Zhang MK (2017). Effects of salt accumulation on acidification and acid composition in protected soils. *Bull Soil Water Conserv*, 37: 43–48 (in Chinese with English abstract) [倪中应, 石一珺, 章明奎(2017). 积盐对设施栽培土壤酸度及酸组成的影响. 水土保持通报, 37: 43–48]
- Peng Z, He S, Sun J, et al (2016). Na⁺ compartmentalization related to salinity stress tolerance in upland cotton (*Gossypium hirsutum*) seedlings. *Sci Rep*, 6: 34548
- Ruiter HD, Kolloffel C (1983). Arginine catabolism in the cotyledons of developing and germinating pea seeds. *Plant Physiol*, 3: 525–528
- Ruiz JM, Sánchez E, García PC, et al (2002). Proline metabolism and NAD kinase activity in greenbean plants subjected to cold-shock. *Phytochemistry*, 5: 473–478
- Shi XL, Zhang ZM, Dai LX, et al (2018). Effects of calcium fertilizer application on absorption and distribution of nutrients in peanut under salt stress. *J Appl Ecol*, 29: 3302–3310 (in Chinese with English abstract) [史晓龙, 张智猛, 戴良香等(2018). 外源施钙对盐胁迫下花生营养元素吸收与分配的影响. 应用生态学报, 29: 3302–3310]
- Silva-Ortega CO, Ochoa-Alfaro AE, Reyes-Aguero JA, et al (2008). Salt stress increases the expression of *P5CS* gene and induces proline accumulation in cactus pear. *Plant Physiol Bioch*, 46: 82–92
- Singh UM, Sareen P, Sengar RS, et al (2013). Plant ionomics: a newer approach to study mineral transport and its regulation. *Acta Physiol Plant*, 35: 2641–2653
- Tavakkoli E, Fatehi F, Coventry S, et al (2011). Additive effects of Na⁺ and Cl⁻ ions on barley growth under salinity stress. *J Exp Bot*, 62: 2189–2203
- Xu CS (2014). Effects of calcium on biomass and antioxidant systems in seedlings of *Malus xiaojinensis* under salt stress. *Plant Physiol J*, 50 (6): 817–822 (in Chinese with English abstract) [徐臣善(2014). 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量及抗氧化系统的影响. 植物生理学报, 50 (6): 817–822]
- Yin L, Wang S, Li J, et al (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol Plant*, 35: 3099–3107
- Zhang GH, Su Q, An LJ, et al (2008). Characterization and expression of a vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter gene from the monocot halophyte *Aeluropus litoralis*. *Plant Physiol Biochem*, 46: 117–126
- Zhang J, Zeng L, Chen S, et al (2018). Transcription profile analysis of *Lycopersicon esculentum* leaves, unravels volatile emissions and gene expression under salinity stress. *Plant Physiol Biochem*, 126: 11–21
- Zhao JW, Li QY, Lu B, et al (2019). Physiological characteristics and comprehensive evaluation of *Pyrus calleryana* Decne. under NaCl stress. *Plant Physiol J*, 55: 23–31 (in Chinese with English abstract) [赵佳伟, 李清亚, 路斌等(2019). 不同品种北美豆梨对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价. 植物生理学报, 55: 23–31]
- Zhao SJ, Cang J (2016). Principles and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese) [赵世杰, 苍晶(2016). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科技出版社]
- Zhou GF, Li BX, Guan G, et al (2018). Effects of acid and alkaline stresses on the growth, photosynthetic characteristics and mineral nutrition of Pummelo ‘HB’. *Chin J Tropic Agric*, 38: 24–31 (in Chinese with English abstract) [周高峰, 李碧娴, 管冠等(2018). 酸、碱胁迫对HB柚生长、光合特性及矿质营养的影响. 热带农业科学, 38: 24–31]
- Zou P, Lu XL, Jing CL, et al (2018). Low-molecular-weight polysaccharides from *Pyropia yezoensis* enhance tolerance of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) to salt stress. *Front Plant Sci*, 9: 427

Effects of simulated soil acidification and salt interaction on mineral elements and osmotic substance in ginger

YIN Feng-Man, CAO Bi-Li, XU Kun*

College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Shandong Collaborative Innovation Center of Fruit & Vegetable Quality and Efficient Production, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops in Huang-Huai Region, Ministry of Agriculture, Taian, Shandong 271018, China

Abstract: In order to investigate the effects of soil acidification and salinization on the growth of ginger, this paper used potted sand culture to simulate soil acidification and salt stress environment by adjusting the pH (6.0, 4.0) and Na^+ (0, 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) levels of Hoagland nutrient solution, and study the changes of the content of mineral elements (Na, K, Ca and Mg) and osmotic substance in various organs of ginger under soil acidification and salt interaction stress. The results showed that acid stress only decreased the growth of ginger stems and leaves, and salt stress inhibited the growth of various organs aboveground and underground, but under salt stress, low pH could reduce the toxicity and promote growth of ginger. Salt stress could significantly increase the content of soluble sugar, soluble protein and proline in ginger leaves, enhance the proline synthesis related enzymes $\Delta 1$ -pyrroline-5-carboxylic acid synthase (P5CS) and ornithine aminotransferase (OAT) activity, and decrease proline dehydrogenase (ProDH) activity; but acid stress had slight effect on the content of osmotic substance and the activities of proline metabolite. Under salt stress, the content of Na in the organs of ginger increased significantly, and the contents of K, Ca and Mg decreased significantly. The acid stress had no significant effect on the related ion content, however, low pH could reduce the Na content in various organs of ginger, regulate the absorption of K, Ca and Mg, increase leaf penetration, maintain osmotic balance, and thus reduce salt damage to ginger.

Key words: ginger; salt stress; acid stress; mineral elements; osmotic substance

Received 2019-03-22 Accepted 2019-05-08

This work was supported by the China Agriculture Research System (CARS-24-A-09) and the “Double First-class” Discipline Construction Project of Shandong Province (SYL2017YSTD06).

*Corresponding author (xukun@sdau.edu.cn).