植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1620–1627
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16013
http://www.plantnutrifert.org

缺氮胁迫下含 Na^+ 叶面肥对花生生长的抑制及补氮后的恢复效应

沈 浦，冯 昊，罗 盛，于天一，郑永美，吴正锋，陈殿绪*，孙学武*，王才斌，郑亚萍
（山东省花生研究所，山东青岛 266100）

摘要:【目的】叶面肥中的钠离子 (Na^+) 大多为伴随离子，其对作物的影响通常被忽视。实践中，Na^+ 对作物的作用包括促进和抑制两方面，取决于作物营养生理状况。研究 Na^+ 对花生的抑制与缺氮 (N) 胁迫的关系，探索补施氮素对上述抑制作用的恢复效应，可为花生高效合理施肥提供理论依据。【方法】盆栽试验在山东省花生研究所人工气候室内进行，设喷施肥料中含 Na^+ 0、2.0、10.0 mg/pot 3 个水平，依次记为 T0、T1 和 T2。测定了花生叶片光合作用、茎叶及根干物质累积、根系形态特性和养分吸收，比较了缺氮胁迫 (T0、T1、T2) 和后期补施尿素态 N (T0-N、T1-N、T2-N) 条件下 Na^+ 对花生影响的差异，并深入分析花生 Na 吸收与干物质累积和氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 养分吸收的相关关系。【结果】1) 缺氮胁迫条件下，叶面喷施 Na^+ 显著抑制了花生的光合作用，净光合速率由 CO_2 11.4 μM/(m^2·s) 下降到 CO_2 6.7～7.5 μM/(m^2·s)。茎叶和根干重 T0 (6.4 和 2.4 g/pot) > T1 (5.7 和 1.9 g/pot) > T2 (5.3 和 1.5 g/pot)。与 T0 相比，根总长度、总表面积和总体积 T1 处理下降了 7.8%～10.5%，T2 处理显著下降了 27.5%～31.8%。植株 Na 与 N、K 含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)，花生 Na 吸收量每增加 1.0 mg/pot，植株总的 N、K 吸收量分别下降 26.6 和 20.9 mg/pot。2) 后期补充喷施氮素条件下，施 Na^+ 处理花生茎叶干物重比不施 Na^+ 处理增加了 20.3%～25.8%。补施氮素后，施 Na^+ 促进了茎叶对 N、P、K 的吸收，N 的吸收量增加了 9.2%～19.2%，P 增加了 20.0%～42.3%，K 增加了 21.4%～24.0%。相关性分析表明，花生植株总干物重及 P、K 含量在补施氮素后与 Na 含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。【结论】Na^+ 对花生生长及养分吸收的影响与氮素营养有关。在缺氮胁迫下，Na^+ 对花生的生长为抑制作用，抑制程度随喷施量增加而加重，高浓度 Na^+ 显著抑制根茎叶干物质的累积和 N、K 养分的吸收。补施氮肥提高了花生植株对 Na^+ 的适应性，恢复了光合作用及养分吸收能力，消除了 Na 胁迫的危害作用，产生“N–Na”协同促进效应。

关键词: 钠胁迫；生长状况；补充供氮；恢复效应
中图分类号: S565.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1620–08

Inhibition of Na^+-containing foliar fertilizer on peanut growth under N deficiency stress and recovery effect by supplemental N spraying

SHEN Pu, FENG Hao, LUO Sheng, YU Tian-yi, ZHENG Yong-mei, WU Zheng-feng, CHEN Dian-xu*, SUN Xue-wu*, WANG Cai-bin, ZHENG Ya-ping
(*Shandong Peanut Research Institute, Qindao, Shandong 266100, China*)

Abstract:【**Objectives**】Sodium (Na^+) is often contained as counterion in foliar fertilizers, so its effect on crop growth is least considered during fertilization. Na^+ plays both promotion and inhibition roles on crop growth, depending on the plant nutrition and physiology status. The inhibition role of Na^+ was studied on peanut exposure to Na^+ stress, and the recovery effect of supplemental spraying N to the inhibition was also investigated.

收稿日期: 2016–01–11　　**接受日期:** 2016–05–06
基金项目: 山东省农业科学院科技创新重点项目（2014CXZ06-2，2014CXZ11-2）；国家自然科学基金项目（41501330，31571617）；山东省农业科学院青年科研基金项目（2015YQN05）；山东省农业重大应用技术创新课题资助。
作者简介: 沈浦（1986—），男，安徽凤阳人，博士，助理研究员，主要从事花生栽培与生理研究。E-mail：shenpu109@163.com
* 通信作者 E-mail：chenzhao126@sina.com；E-mail：sunwu50@163.com

【**Methods**】A pot experiment was conducted inside the growth chamber located in Shandong Peanut Research Institute. Three levels of Na^+ were designed in the foliar fertilizer: Na^+ 0, 2.0 and 10.0 mg/pot, and recorded as T0, T1 and T2 in turn. The peanut photosynthesis, dry matter accumulation, root morphology, nutrient absorption were investigated in both N deficit stresses (T0, T1, T2) and later urea supplement (T0-N, T1-N, T2-N). The effect of Na absorption on the N, P and K absorption was analyzed.【**Results**】1) Without N supplement, the net photosynthetic rates were significantly decreased from 11.4 CO_2 μM/(m^2·s) to 6.7–7.5 CO_2 μM/(m^2·s) in Na containing treatments, the dry weights of shoot and root were in order of T0 (6.4 and 2.4 g/pot) > T1 (5.7 and 1.9 g/pot) > T2 (5.3 and 1.5 g/pot). Total root length, surface area, and volume in T1 and T2 treatments were decreased by 7.8%–10.5% and 27.5%–31.8% compared with T0. 2) With later supplement of N, Na^+ inhibition in photosynthesis was recovered quickly. The shoot dry weights in T1-N and T2-N treatments were increased by 20.3%–25.8% compared with T0-N. The inhibition of Na^+ became promotion of N, P, K absorption. The shoot N, P, K absorptions in T1-N and T2-N treatments were respectively increased by 9.2%–19.2%, 20.0%–42.3%, 21.4%–24.0% compared with T0-N. The total dry weight of peanut and N, K absorptions were positively correlated with Na^+ ($P < 0.05$).【**Conclusions**】Under N deficit, Na^+ shows inhibition effect on the growth and nutrient absorption of peanut and the effect will become exaggerated with the increased Na^+ contents in fertilizers.This inhibition will be remarkably correlated by later supplement of N, and the inhibition role will change to promotion role of Na^+. Therefore, application of Na^+ containing fertilizer, especially those with high Na^+ concentration, should consider the N supply in order to relieve the possibly harmful effect of Na^+.

Key words: sodium stress; growth inhibition; N supplemental supply; recovery effect

Na^+ 常常被认为是造成作物盐碱危害的主要离子，其可通过渗透胁迫引起营养元素的缺乏，易造成活性氧清除酶 (如 SOD、POD 等) 失活，置换细胞膜中的 Ca^{2+}，引起膜脂、蛋白质、核酸等的降解，破坏细胞组分，进而影响植株生长发育[1–3]。但近年来研究表明，很多植株的生长需要一定量的 Na^+ 以维持渗透压、促进碳水化合物代谢等，且 Na^+ 能够提高一些作物的叶面积指数、增加光截获能力，以及具有替代植株其他营养元素 (如 K^+) 的作用[4–7]。前人研究已证实，Na^+ 对作物的抑制作用与营养生理状况有很大关系，而缺氮胁迫是其中一个重要的因素[8–9]。由于土壤供给能力、氮肥利用效率及品种等方面的差异，作物缺氮胁迫现象时有发生[10–11]。缺氮胁迫下作物生长发育一方面会受到显著抑制，另一方面作物自身也会产生一系列生理生化的适应性变化[12–13]。由此可见，缺氮胁迫下 Na^+ 对作物生长发育的影响需要研究予以证实。

花生是我国重要的油料作物、经济作物，在国民生产中有重要的作用[14–15]。生产中，花生可通过肥料及土壤吸收一定量的 Na^+，特别是使用叶面施肥过程中，一些含 Na^+ 成分 (EDTA-Na_2、氯化钠、亚硫酸氢钠、四水八硼酸钠、复硝酚钠、硝普钠和葡萄糖酸钠等) 随营养元素一起喷施在叶面而进入植株体内[16–19]。对此，大多数研究仅关注该肥料中营养元素 (如 N、P、K 等) 的吸收利用状况，而 Na^+ 对花生的真实影响却鲜有报道。Na^+ 对花生的作用可能与其施入量 (或浓度) 有关，且较高 Na^+ 施入量会对花生生长造成不利影响[20–21]。这种不利影响可能首先表现在叶片受损、养分吸收受到抑制、光合产物下降，而地下部根系发育是否受到抑制还不明确。作者前期研究结果发现叶面喷施氮素能够显著改善花生的叶面积、SPAD 值及净光合速率，这主要由于氮素是花生蛋白质和核酸的组成元素，又是光合作用所必需的叶绿素、各种代谢调控酶、激素的构成元素[22–23]。然而，叶面喷施 Na^+ 是否会对花生产生抑制作用以及这种抑制能否通过补施氮素缓解，有待于深入研究。

本文利用人工气候室盆栽试验，研究了缺氮素胁迫下含不同浓度 Na^+ 叶面肥对花生光合作用、干物质累积、根系形态及养分吸收的影响差异。同时，比较了补施氮素对各处理的作用效果，以探究叶面喷施氮肥能否消除或缓解 Na^+ 的影响，以及对花生的光合作用和生长发育的恢复效应。本研究的开展可为花生高效合理施肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

花生品种为山东省花生研究所培育的花育 20 号，该品种为小花生类型。试验喷施液中钠来源于氢氧

化钠，氮来源于尿素，磷、钾来源于磷酸二氢钾，三种化学试剂均为上海国药集团生产。供试土壤采自于山东省花生研究所莱西试验农场，土壤类型为棕壤，pH 值为 5.1、有机质 11.6 g/kg、速效磷 26.5 mg/kg、碱解氮 56.3 mg/kg、速效钾 70.0 mg/kg。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2014 年 11 月 27 日到 2015 年 2 月 2 日在山东省花生研究所人工气候室开展，气候室内昼夜温度为 28℃/22℃、相对湿度 65%/70%。试验盆钵直径 15 cm、高 20 cm，每盆用土 2.1 kg，盆内土壤不施基肥。每盆播入 3 粒花生种，在齐苗后间苗，保留 2 棵长势均匀的花生苗。盆栽试验每 2 天浇水 1 次，按最大田间持水量的 75% 左右保持土壤含水量。

2014 年 12 月 22 日 (四叶期) 开始叶面喷施含氢氧化钠及磷酸二氢钾溶液，每周喷 1 次，共喷施 3 次；试验喷施的 Na 及 N、P、K 含量状况见表 1。试验处理 T0 喷施液的 pH 值为 5.0；T1 处理以 T0 为基础，喷施液中加 Na 量为 2.0 mg/pot (每次喷施 Na 8.5 mL、0.08 mg/mL)，喷施液 pH 值为 6.0；T2 处理加 Na 量为 10.0 mg/pot (每次喷施 Na 8.5 mL、0.4 mg/mL)，喷施液 pH 值为 7.0。其中，T2 处理叶面肥中 Na^+ 浓度依据常见含钠叶面肥喷施状况 (0.4‰) 设定。从 2015 年 1 月 12 日 (七叶期) 开始，一半盆栽喷施蒸馏水 (T0、T1 和 T2 处理)，一半盆栽喷施氮素 (T0-N、T1-N 和 T2-N 处理)，每周 1 次，共喷施 3 次，各试验处理均重复 3 次。

表 1 处理编号及叶面喷施元素量 (mg/pot)

Table 1 Treatment code and element for spraying solution

处理 Code	Na^+	N	P	K
T0	0	0	22.0	27.6
T1	2.0	0	22.0	27.6
T2	10.0	0	22.0	27.6
T0-N	0	60	22.0	27.6
T1-N	2.0	60	22.0	27.6
T2-N	10.0	60	22.0	27.6

1.3 取样与测定

2015 年 2 月 2 日先利用 CIRAS-3 光合仪 (PP Systems 公司，美国) 测定花生叶片净光合速率。然后取整株花生，将其分为根部和茎叶部。根部用 WinRHIZO 根系分析系统 (Regent Instruments 公司，加拿大) 测定根长度、根表面积、根体积等根系形态参数[24]。植株根和茎叶烘干后，测定干物重；然后样品粉碎磨细，用 H_2SO_4–H_2O_2 进行消化，依次测定 N、P、K 和 Na 含量[25]。

1.4 数据处理

采用 Sigmaplot10.0 作图，花生干物重、根系形态特性、NPK 和 Na 含量用 SAS 8.0 软件进行各处理之间差异显著性分析 (ANOVA) 和各指标之间相关显著性分析。

2 结果与分析

2.1 花生地上部干物质累积及净光合速率变化

缺氮胁迫下，喷施高 Na^+ 叶面肥可显著抑制花生净光合速率及干物质累积 (图 1)。T0 处理净光合速率为 CO_2 11.4 μM/(m^2·s)，喷施 Na^+ 叶面肥显著下降到 CO_2 6.7～7.5 μM/(m^2·s)(T1 和 T2 处理)。花生地上部茎叶干物重随着 Na^+ 增加而逐渐下降，T0、T1 和 T2 处理分别为 6.4、5.7 和 5.3 g/pot。然而，补施氮素条件下，加入 Na^+ 处理 T1-N 和 T2-N (8.4 和 8.1 g/pot) 地上部茎叶干物重却显著高于不加 Na^+ 处理 T0-N (6.7 g/pot)。同时，净光合速率各处理没有显著差异，且以 T2-N 较高。在缺氮胁迫条件下，随着叶面肥 Na^+ 增加，花生干物质重量受到显著抑制，而后期补充喷施氮素可缓解 Na^+ 的抑制，甚至表现出促进干物质累积的作用。

2.2 花生根重及形态变化

缺氮胁迫下，花生根重及形态对叶面肥中 Na^+ 的响应非常敏感 (图 2)。根干重由 T0 的 2.4 g/pot 下降到 T1 的 1.9 g/pot 和 T2 的 1.5 g/pot。补施氮素后，3 个处理根干重 T1-N 高于 T0-N 和 T2-N，T0-N 降低到 1.7 g/pot，而 T1-N 处理增加到 2.1 g/pot，T2-N 处理维持在 1.5 g/pot。

花生根系形态也有相同的变化特征 (图 2)。在缺氮胁迫条件下，叶面肥加入 Na^+ 后，根总长度、根总表面积和根总体积都呈现下降趋势，T1 比 T0 分别下降 7.8%～10.5%，T2 比 T0 分别显著下降了 27.5%～31.8%。补施氮素后，T0-N 根系形态受到抑制，根总长度、根总表面积和根总体积仍高于 T2-N 处理 11.3%～21.4%，却比 T1-N 处理下降了 14.2%～21.0%。

三个根系形态指标总量对叶面肥 Na^+ 的响应虽然相似，但从不同直径根系来看，在缺氮胁迫条件下，高 Na^+ (T2 处理) 对根长的抑制从细根 (< 0.5 mm) 开始，直径超过 1.5 mm 根系受其抑制作用较弱；而根表面积及根体积则从粗根 (> 1.5 mm) 开始，其受高 Na^+ 的抑制越来越大 (图 3a1、图 3b1、图 3c1)。

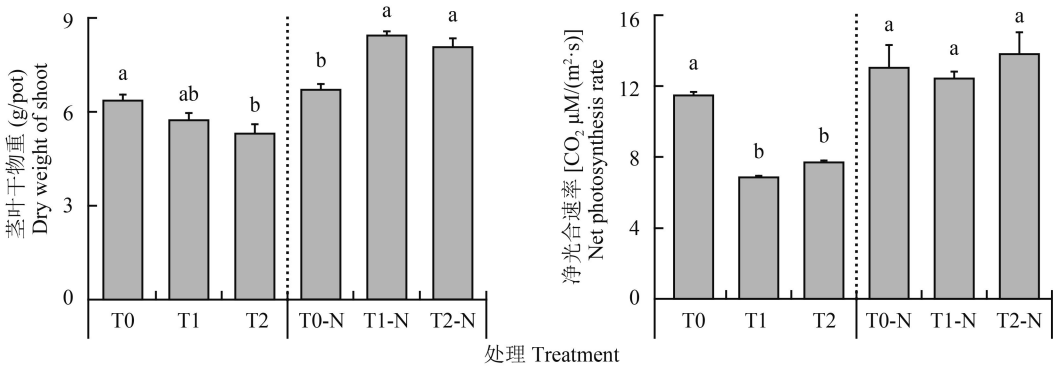

图 1　花生茎叶干重及净光合速率变化

Fig. 1　Changes in dry weight of shoot and net photosynthesis rate

[注（Note）：柱上不同字母表示缺氮胁迫和补施氮肥各处理间差异达到 5% 显著性水平 Different letters above the bars indicate significant differences at 5% level among different treatments without N supplement and with later supplement of N.]

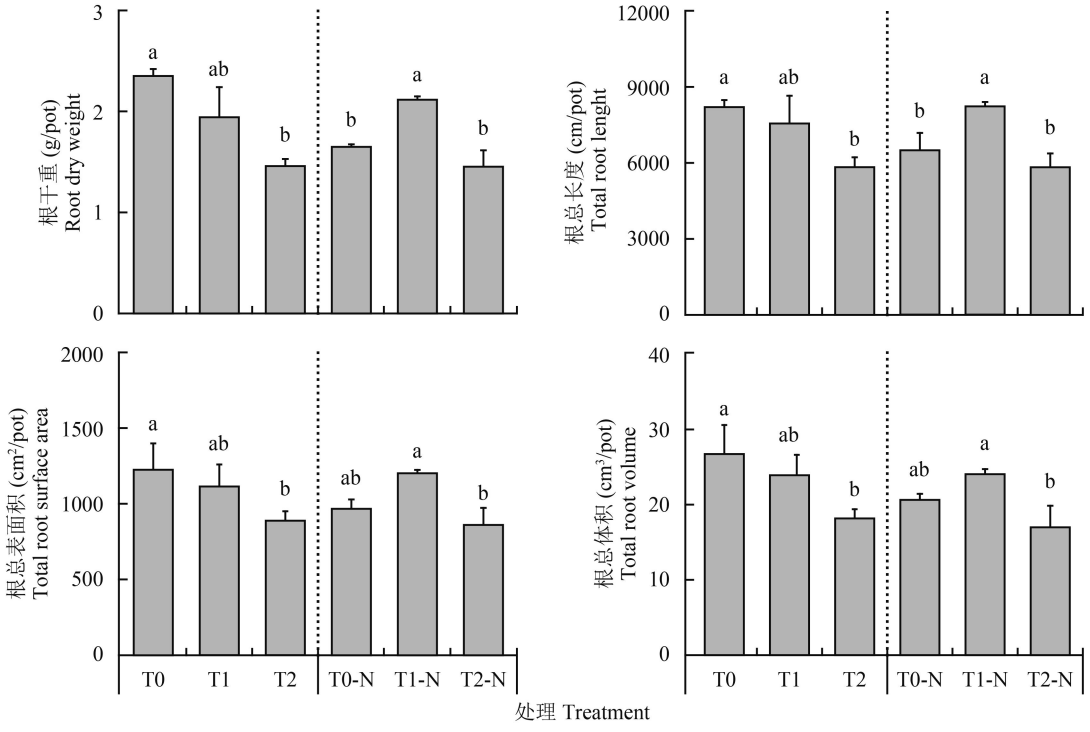

图 2　花生根干重及总根系形态变化

Fig. 2　Changes in dry weight of root and root morphological peanut

[注（Note）：不同字母表示缺氮胁迫和补施氮肥各处理间差异达到 5% 显著性水平 Different letters above the bars indicate significant differences at 5% level among different treatments without N supplement and with later supplement of N.]

补施氮素下，低 Na^+ (T1-N) 对根长的恢复也从细根 (< 0.5 mm) 开始，而根表面积和根体积的恢复则从粗根 (> 1.5mm) 开始 (图 3a2、图 3b2、图 3c2)。

2.3　花生钠吸收对干物质累积及氮、磷、钾营养的影响

叶面喷施 Na^+ 显著提高了茎叶对钠的吸收，缺氮胁迫下高 Na^+ 处理 (T2) 茎叶钠吸收量显著高于 T1 和 T0 处理 (图 4)，补施氮素下植株钠含量表现为：T2-N > T1-N、T0-N。缺 N 胁迫下 Na^+ 对茎叶 N 的吸收也产生了显著影响，各处理茎叶氮素吸收量分别为 T0 (144.1 mg/pot) > T1 (132.0 mg/pot) > T2 (115.4 mg/pot)。补施氮素后，三个处理茎叶氮吸收量都显著增加，而处理间以 T1-N (251.1 mg/pot) 最高，T2-N (230.0 mg/pot) 次之，T0-N (210.7 mg/pot) 最低。对于茎叶磷、钾，缺氮胁迫下 T1 和 T2 处理与 T0 处理相比有下降趋势，但没有达到显著差异水平。然而，

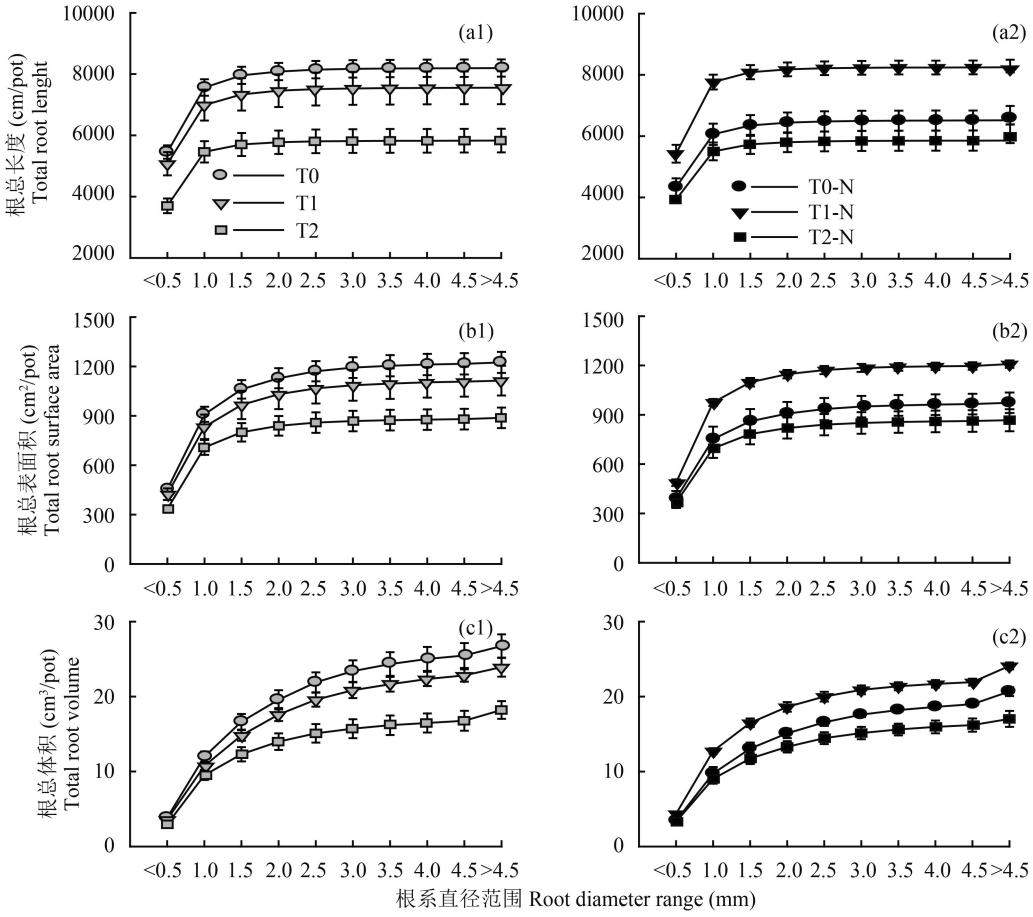

图 3 花生根系在不同直径范围的累积动态变化

Fig. 3 Dynamics of root accumulations within different diameter range

补施氮素下施 Na^+ 处理尤其高 Na^+ 处理显著高于不喷 Na^+ 处理，T2-N 处理比 T0 处理磷吸收量和钾吸收量分别显著增加 42.3% 和 24.0%。

在缺氮胁迫条件下，花生根系对 Na 的吸收量在喷施 Na^+ 后略有增加，但未达到显著差异；补施氮素后，各处理根的 Na 吸收量都下降至 0.42 mg/pot 左右。根系对 N、P、K 的吸收量与根干重相似，随着喷施 Na^+ 浓度增加呈下降趋势，T0 处理根的 N、P、K 吸收量大于 T1 和 T2 处理。补施 N 素促进了低 Na^+ 处理 (T1-N) 根部对 N、P、K 的吸收，其吸收量总体高于其他两个处理 (T0-N 和 T2-N)。

相关性分析表明，植株 Na 含量 (根与茎叶总吸收量) 与干物重在缺氮胁迫条件下呈显著负相关关系 ($r = 0.69$*)，若每盆花生 Na 吸收量增加 1.0 mg，干物重将下降 1.2 g，同时花生氮、钾吸收量也显著下降 26.6 mg 和 20.9 mg，而磷素的响应并不明显 (图 5)。补施氮素下，花生植株干物重及营养状况与 Na 吸收却呈正相关关系，其中 Na 与植株干物重 ($r = 0.65$*)、磷含量 ($r = 0.71$*) 和钾含量 ($r = 0.80$**) 相关性达显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论

含 Na^+ 叶面肥对花生的影响在缺氮胁迫条件下表现为抑制作用，且这种抑制对于高 Na^+ 量处理更为显著。喷施的 Na^+ 随气孔或胞间连丝进入植株体内，易产生渗透胁迫，致使植株体内的一些必需营养元素缺乏[1]。由于 Na^+ 与 K^+ 可竞争结合酶复合物的结合点位，以及 Na^+ 同带正电荷的 K^+、NH_4^+ 产生的阳离子易产生一定竞争作用[26]，因而本研究中花生钠含量与氮、钾含量呈显著负相关关系，而与磷含量关系不显著 ($H_2PO_4^-$、HPO_4^{2-}带负电荷)。笔者前期研究证实，喷施液由 pH 5 增加到 pH 7 后，花生磷的吸收浓度增加，而总磷吸收量没有显著增加[24]。随着植株吸收的钠量增加，花生氮、钾 (尤其是氮素) 吸收受抑制更为显著，这就使得花生的光合作用受限、净光合速率显著下降。事实上，不仅地上部茎

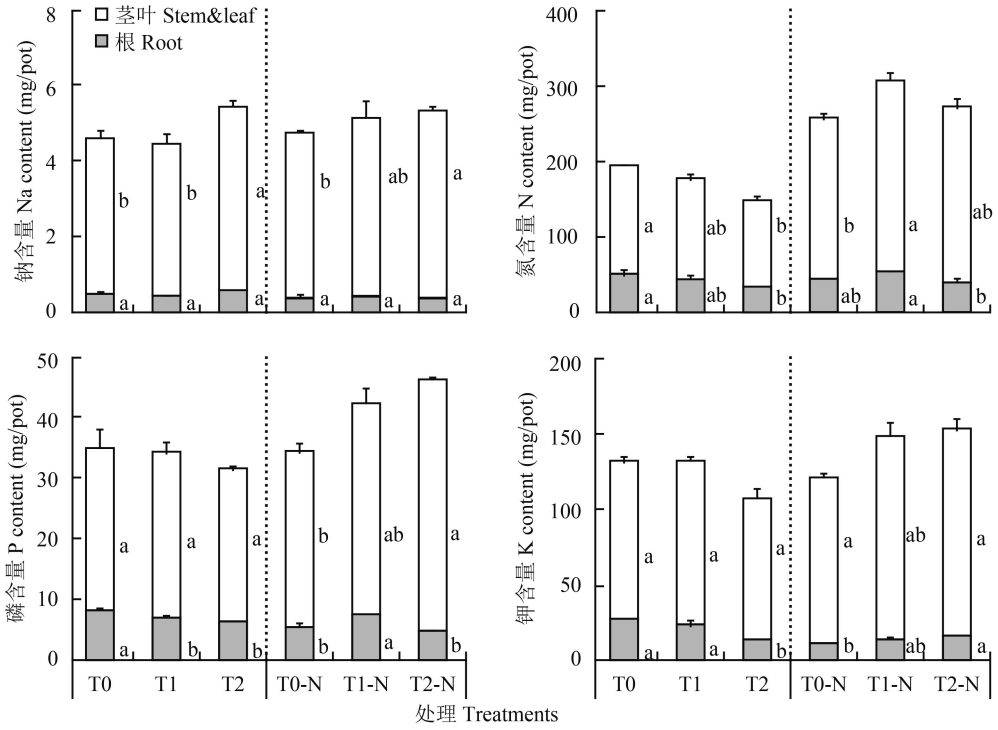

图 4　花生茎叶和根中钠及氮、磷、钾含量

Fig. 4　Contents of Na, N, P and K in shoot and root of peanut

[注（Note）：方柱上和方柱下不同字母分别表示缺氮胁迫和补施氮素后各处理间茎叶和根的含量差异达到 5% 显著性水平 Different letters above the bars and below the bars indicate significant differences at 5% level among different treatments without N supplement and with later supplement of N for shoot and root, respectively.]

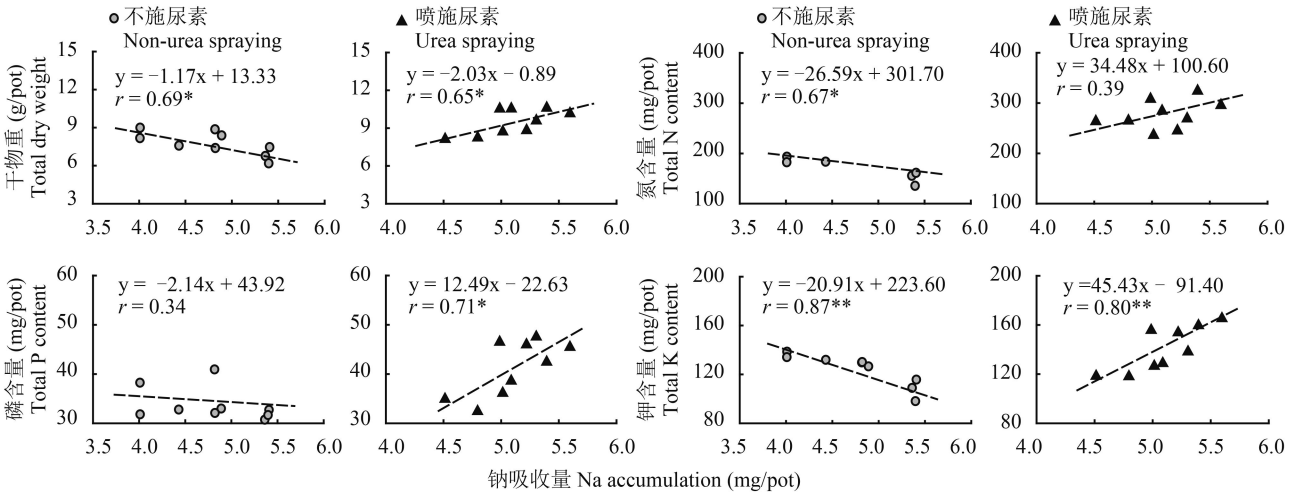

图 5　花生钠吸收量与干物质累积及氮磷钾营养的相关关系

Fig. 5　Relations between Na accumulation and dry weight of plant and N, P, K contents in peanut

叶在喷施含 Na^+ 溶液后干物重显著下降，地下部根系的发育也受到显著抑制，根的长度、表面积及体积也显著下降。茎叶及根系生长受到抑制除了上述原因外，Na 累积能够导致花生体内蛋白质和核酸的代谢不能正常进行，从而使得一些有毒次生产物 (如游离氨基酸、胺等) 产生，进而影响花生生长发育及干物质累积，且这些抑制作用在缺氮胁迫下表现更为明显。

后期补充喷施氮素后，花生受 Na^+ 胁迫现象消除。叶面氮肥可通过增加叶绿素含量，提升光系统 PSII 反应中心内部光能转换效率等，促使叶片光合作用的恢复[23, 27]。同时，氮素是蛋白质、氨基酸、核酸

等重要组成成分，叶面氮肥也显著改善了作物营养，从而促进了干物质的累积[28–31]。相关性分析表明，花生对 Na 的吸收在补施氮素下甚至与干物质累积，N、P、K 含量呈正相关关系。对于茎叶的干物重，补施氮素和含 Na^+ 肥料比单独补施氮素显著增加，根的干物重也以喷施 Na^+ 溶液和氮素最高。有研究表明，Na^+ 能够提高植株体中硝酸还原酶的活性及叶绿体对丙酮酸盐的吸收，推进光合磷酸化过程[6, 32–33]。另外，氮肥的施用在促进花生生长发育及干物质累积的同时，对植株体内 Na^+ 的抑制作用也起到一定的稀释效应。因而，喷施 Na^+ 结合氮肥显著促进了花生的干物质累积及养分吸收。可见，Na^+ 对花生生长及养分吸收影响与氮素水平有很大关系，后期补施氮肥提高了植株对 Na^+ 的适应性，消除了 Na 胁迫的危害作用，产生“N–Na”协同效应。

4 结论

叶面喷施含 Na^+ 肥料在缺氮胁迫条件下抑制了花生的光合作用、干物质累积及氮、钾养分吸收，这种抑制随着喷施 Na^+ 含量增加而更显著。后期补施氮肥后，这种抑制作用能够及时消除，花生的光合作用恢复、干物质累积和氮、磷、钾养分吸收显著增加。

参 考 文 献：

[1] 曲元刚, 赵可夫. NaCl和Na_2CO_3对盐地碱蓬胁迫效应的比较[J]. 植物生理与分子生物学报, 2003, 29(5): 387–394.
Qu Y G, Zhao K F. Comparision of the stress effects of NaCl and Na_2CO_3 on *Suaeda salsa* L [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(5): 387–394.

[2] Surekha K A, Paul V, Zhu J K. Mechanisms of tolerance in plants [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 44–45.

[3] 蔡建一, 马清, 周向睿, 等. Na^+在霸王适应渗透胁迫中的生理作用[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 89–95.
Cai J Y, Ma Q, Zhou X R, *et al*. Physiological role of Na^+ in adaption of *Zygophyllum xanthoxylum* to osmotic stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(1): 89–95.

[4] Sobbarao G V, Ito O, Berry W L, *et al*. Sodium–a functional plant nutrient [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22: 391–416.

[5] 郑小林, 钟炳辉, 陈荣清. 钾、钠离子对富钾植物离体叶片气孔运动的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 320–323.
Zheng X L, Zhong B H, Chen R Q. Effect of K^+, Na^+ on isolated leaves' stomatal movement of rich potassium plants [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(2): 320–323.

[6] 李三相, 周向睿, 王锁民. Na^+在植物中的有益作用[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 485–490.
Li S X, Zhou X R, Wang S M. Positive functions of sodium in plants [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(3): 485–490.

[7] 雷晶, 郝艳淑, 王典, 等. 钠钾替代对不同基因型棉花钾利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 962–968.
Lei J, Hao Y S, Wang D, *et al*. Substitution effect of sodium and potassium on potassium use efficiency of different cotton genotypes [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 962–968.

[8] 逄焕成, 杨劲松, 谢晓红. 氯化钠胁迫下施氮对冬小麦生长发育及体内氯、钠离子积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 654–658.
Pang H C, Yang J S, Xie X H. Effects of nitrogen fertilization on growth and vivo Cl^- and Na^+ accumulation of winter wheat under NaCl stress [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 654–658.

[9] 张智猛, 万书波, 宁堂原, 等. 氮素水平对花生氮素代谢及相关酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1407–1416.
Zhang Z M, Wan S B, Ning T Y, *et al*. Effects of nitrogen on nitrogen metabolism and correlation enzyme activity in peanut [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32 (6): 1407–1416.

[10] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. 生态科学, 1998, 17(2): 37–42.
Zhao P, Sun G C, Peng S L. Ecophysiological research on nitrogen nutrition of plant [J]. Ecologic Science, 1998, 17(2): 37–42.

[11] 曹翠玲, 李生秀, 苗芳. 氮素对植物某些生理生化过程影响的研究进展[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(4): 96–101.
Cao C L, Li S X, Miao F. The research situation about effects of nitrogen on certain physiological and biochemical process in plants [J]. Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-Occidentalis, 1999, 27(4): 96–101.

[12] 林郑和, 陈荣冰, 陈常颂. 植物对氮胁迫的生理适应机制研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(23): 4761–4764.
Lin Z H, Chen R B, Chen C S. Research progress on physiological adaptability of plants to nitrogen deficiency [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(23): 4761–4764.

[13] 李梁, 黄剑华, 陈志伟, 等. 作物耐低氮的相关生物学研究进展[J]. 上海农业学报, 2012, 28(2): 117–122.
Li L, Huang J H, Chen Z W, *et al*. Progress of biological research on crops tolerant to low nitrogen [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2012, 28(2): 117–122.

[14] 万书波. 中国花生栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 252–262.
Wan S B. China peanut cultivation [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 2003: 252–262.

[15] 王才斌, 万书波. 花生生理生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
Wang C B, Wan S B. Peanut physiological ecology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.

[16] 胡哲森, 时忠杰, 许长钦. 亚硫酸氢钠对油茶光合机构的生理效应研究[J]. 林业科学, 2001, 37(专刊1): 68–71.
Hu Z S, Shi Z J, Xu C Q. Phosiological effect of sodium bisulfate on photosynthetic apparatus of *Camellia oleifera* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(Special 1): 68–71.

[17] 李瑞海. 不同配方叶面肥对作物生长的影响[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文. 2008.
Li R H. Effects of different formulas of foliar fertilizers on crop

growth [D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University. 2008.

[18] 李红利, 王俊玲, 薛占军, 等. 硝普钠对韭菜叶片硝酸盐累积及营养品质的影响[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(4): 53–57.
Li H L, Wang J L, Xue Z J, *et al*. Effects of sodium nitroprusside (SNP) on nitrate accumulation and nutritional quality in the leaves of Chinese chive [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2014, 37(4): 53–57.

[19] 于会丽, 林治安, 李燕婷, 等. 喷施小分子有机物对小油菜生长发育和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1560–1568.
Yu H L, Lin Z A, Li Y T, *et al*. Effects of spraying low molecular organic compounds on growth and nutrients uptake of rape (*Brassica Chinensis* L.)[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1560–1568.

[20] 杨劲松. 作物对不同盐胁迫和调控条件的响应特征与抗盐性调控研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文. 2006.
Yang J S. Characteristics of crop response on different salt stresses/management and the regulation of crop salt resistance [D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University. 2006.

[21] 慈敦伟, 张智猛, 丁红, 等. 花生苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 805–814.
Ci D W, Zhang Z M, Ding H, *et al*. Evaluation and selection indices of salinity tolerance in peanut seedling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 805–814.

[22] 万书波. 花生品种改良与高产优质栽培[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
Wan S B. Peanut variety improvement and high-yield and high-quality cultivation [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.

[23] 罗盛, 杨友才, 沈浦, 等. 花生氮素吸收、根系形态及叶片生长对叶面喷施尿素的响应特征[J]. 山东农业科学, 2015, (10): 45–48.
Luo S, Yang Y C, Shen P, *et al*. Characteristics of peanut nitrogen uptake, root morphology and leaf growth to foliar-spraying urea [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, (10): 45–48.

[24] 沈浦, 罗盛, 吴正锋, 等. 花生磷吸收分配及根系形态对不同酸碱度叶面磷肥的响应特征[J]. 核农学报, 2015, (12): 2418–2424.
Shen P, Luo S, Wu Z F, *et al*. Response of P absorption-allocation rate and root morphology of peanut to P foliar fertilizers with different acidities [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, (12): 2418–2424.

[25] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[26] Schachtman D P, Schroeder J I. Structure and transport mechanism of a high-affinity potassium uptake transporter from higher plants [J]. Nature, 1994, 370(6491): 655–658.

[27] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
Xu D Q. Photosynthesis efficiency[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002.

[28] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 162–172.
Li Y T, Li X Y, Xiao Y, *et al*. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 162–172.

[29] 梁雄, 彭克勤, 杨毅. 叶面施肥对花生光合作用和植物激素的影响[J]. 作物研究, 2011, 25(1): 15–18.
Liang X, Peng K Q, Yang Y. Effect of foliage spraying on photosynthetic indexes and plant hormones of peanut at blossom stage [J]. Crop Research, 2011, 25(1): 15–18.

[30] 吴正锋. 花生高产高效氮素养分调控研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
Wu Z F. Nitrogen management for high yield and high efficiency of peanut [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.

[31] 李灿东, 郭泰, 王志新, 等. 叶面氮素施量对大豆氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (5): 1361–1365.
Li C D, Guo T, Wang Z X, *et al*. Effects of leaf nitrogen application on soybean nitrogen uptake and distribution [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21 (5): 1361–1365.

[32] Terry N, Ulrich A. Effects of potassium deficiency on the photosynthesis and respiration of leaves of sugar beet [J]. Plant Physiology, 1973, 51: 783–786.

[33] 邹邦基. 钠的植物营养与生理生态[J]. 植物生理学通讯, 1985, 5: 5–11.
Zou B J. Plant nutrition and physiological ecology of sodium [J]. Plant Physiology Communications, 1985, 5: 5–11.