

NaCl 胁迫下 pH 值和氮素形态对狗牙根 生长及钠钾离子调控的影响

陈静波, 李丹丹, 郝东利, 宗俊勤, 姚 祥, 刘建秀, 郭海林^①

[江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园)江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014]

摘要: 以狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.] 品种‘阳江’(‘Yangjiang’)为实验材料, 2-(*N*-吗啡啉)乙磺酸(MES)为 pH 缓冲剂, 采用水培法研究 NaCl 胁迫下 pH 值和氮素形态(铵态氮和硝态氮)对狗牙根生长和钠钾离子调控的影响。结果表明: 处理 1 周后, 若不添加 MES, 铵态氮处理组培养液的 pH 值下降到 pH 4.0 左右, 而硝态氮处理组培养液的 pH 值则上升到 pH 9.0 左右; 添加 20 mmol · L⁻¹ MES 的铵态氮处理组培养液的 pH 值也下降到 pH 4.0 左右, 而硝态氮处理组培养液的 pH 值则接近 pH 7.0。与 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组相比, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组狗牙根的枝条长度和枝条干质量显著($P < 0.05$)下降, 而根长度、根干质量、根和叶中 Na⁺ 含量和 Na⁺/K⁺ 比、钠钾选择性转运系数、叶 Na⁺ 和 K⁺ 的分泌量及分泌物 Na⁺/K⁺ 比总体上显著升高。300 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫下, 硝态氮处理组狗牙根的枝条长度、根长度、根干质量、根冠比、根中 Na⁺ 含量总体上显著高于铵态氮处理组, 而叶中 Na⁺ 和 K⁺ 含量及 Na⁺/K⁺ 比、叶 Na⁺ 和 K⁺ 的分泌量明显低于铵态氮处理组。300 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫下, 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组狗牙根的多数生长指标显著高于 0 mmol · L⁻¹ MES 处理组, 而根和叶中 Na⁺ 和 K⁺ 含量及 Na⁺/K⁺ 比、钠钾选择性转运系数在 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的差异不显著。三因素方差分析结果表明: 3 个因子的单一和交互作用对多数生长指标、叶中 Na⁺ 含量和泌盐量相关指标的影响具有统计学意义。研究结果显示: 硝态氮能缓解 NaCl 胁迫对狗牙根的伤害, 而用 MES 缓冲根际酸碱环境对 NaCl 胁迫下狗牙根生长有一定的促进作用, 因此, 施用硝态氮或添加 MES 均有利于提高狗牙根的抗盐性。

关键词: 狗牙根; NaCl 胁迫; 氮素形态; pH 值; 离子调控; 三因素方差分析

中图分类号: Q948.11; Q945.78; S543⁺.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)02-0030-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.04

Effects of pH value and nitrogen form on growth and sodium and potassium ion regulation of *Cynodon dactylon* under NaCl stress CHEN Jingbo, LI Dandan, HAO Dongli, ZONG Junqin, YAO Xiang, LIU Jianxiu, GUO Hailin^① [Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(2): 30-40

Abstract: Taking cultivar ‘Yangjiang’ of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. as research material and 2-(*N*-morpholino) ethanesulfonic acid (MES) as pH buffer agent, the effects of pH value and nitrogen form (ammonium nitrogen and nitrate nitrogen) on growth and sodium and potassium ion regulation of *C. dactylon* under NaCl stress were studied by using water culture method. The results show that, after treatment for one week, the pH value of culture solution in ammonium nitrogen treatment group without

收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目(苏[2023]TG01); 国家自然科学基金面上项目(32271758); 江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2021]19)

作者简介: 陈静波(1977—), 男, 浙江余姚人, 博士, 副研究员, 主要从事草类植物育种和栽培研究。

^①通信作者 E-mail: ghlnmg@sina.com

引用格式: 陈静波, 李丹丹, 郝东利, 等. NaCl 胁迫下 pH 值和氮素形态对狗牙根生长及钠钾离子调控的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(2): 30-40.

adding MES decreases to about pH 4.0, while that in nitrate nitrogen treatment group increases to about pH 9.0; the pH value of culture solution in ammonium nitrogen treatment group with adding 20 mmol · L⁻¹ MES also decreases to about pH 4.0, while that in nitrate nitrogen treatment group approaches pH 7.0. Compared with 0 mmol · L⁻¹ NaCl treatment group, the shoot length and dry mass of shoot of *C. dactylon* in 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment group significantly ($P < 0.05$) decrease, while the root length, dry mass of root, Na⁺ content and Na⁺/K⁺ ratio of root and leaf, selective transport coefficient of sodium and potassium, Na⁺ and K⁺ secretion levels and Na⁺/K⁺ ratio of secretion of leaf significantly increase in general. Under 300 mmol · L⁻¹ NaCl stress, the shoot length, root length, dry mass of root, root/shoot ratio, Na⁺ content in root in nitrate nitrogen treatment group are significantly higher than those in ammonium nitrogen treatment group in general, while the Na⁺ and K⁺ contents and Na⁺/K⁺ ratio of leaf and Na⁺ and K⁺ secretion levels of leaf are obviously lower than those in ammonium nitrogen treatment group. Under 300 mmol · L⁻¹ NaCl stress, most growth indexes of *C. dactylon* in 20 mmol · L⁻¹ MES treatment group are significantly higher than those in 0 mmol · L⁻¹ MES treatment group, while the differences in Na⁺ and K⁺ contents and Na⁺/K⁺ ratio of root and leaf, selective transport coefficient of sodium and potassium between 0 and 20 mmol · L⁻¹ MES treatment groups are not significant. The result of three-factor analysis of variance shows that there are statistical significances in effects of single effect and interaction of the three factors on most growth indexes, Na⁺ content in leaf, and salt secretion related indexes. It is suggested that nitrate nitrogen can alleviate the damage of NaCl stress on *C. dactylon*, while buffering rhizosphere acidic-base environment with MES has a certain promoting effect on the growth of *C. dactylon* under NaCl stress. Therefore, the application of nitrate nitrogen or the addition of MES is beneficial to improve the salt tolerance of *C. dactylon*.

Key words: *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.; NaCl stress; nitrogen form; pH value; ion regulation; three-factor analysis of variance

盐胁迫是一种常见的环境胁迫因子,会对植物产生渗透胁迫、离子毒害及营养元素缺乏等伤害^[1-2]。研究发现,Na⁺和Cl⁻的危害极大,易造成盐离子毒害并对其他营养元素离子(例如K⁺、NO₃⁻)的吸收产生拮抗作用,致使植物出现营养缺乏症状,通常表现为Na⁺含量增加、K⁺含量降低、Na⁺/K⁺比增加、离子平衡被破坏等^[2-4]。Ashraf等^[5]认为,合适的栽培措施可以减少盐胁迫下植物体内盐离子的积累,维持植物体内营养元素稳定在一定水平,在一定程度上提高植物的抗盐性。

氮是植物生长发育过程中需求量最大的营养元素,但盐碱地土壤中的氮含量却非常低(如光滩地0~20 cm土层全氮含量仅为0.51 g · kg⁻¹^[6]),氮缺乏对植物生长的危害甚至比盐胁迫还严重^[7]。即使在氮充足的条件下,盐胁迫仍会抑制植物对氮的吸收和利用^[8-9]。因此,在盐碱地中生长的植物面临着盐害和缺氮的双重胁迫,生存状况堪忧。相关研究结果表明:施用适量的氮肥能够提高植物的抗盐性,且不同种类植物、不同水平盐胁迫以及不同浓度和形态氮素均会对植物的抗盐性产生影响^[10-12]。

硝态氮和铵态氮是无机氮的2种主要形态,硝态

氮带有负电荷,会导致植物根际碱化,而铵态氮带有正电荷,会导致植物根际酸化^[13]。不同氮素形态不仅会直接影响其他元素(包括盐离子)的吸收,还会间接影响其他元素的溶解性和吸收效果^[14]。相关研究结果表明:不同氮素形态下植物的生长和抗盐性存在明显差异^[12,15-17]。例如:盐胁迫下,铵态氮处理组高粱[*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench]体内的Na⁺含量低于硝态氮处理组、K⁺含量高于硝态氮处理组^[16],而硝态氮处理组芥菜[*Brassica juncea* (Linn.) Czern.]的生长和钾含量均高于铵态氮处理组^[17]。

狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]为禾本科(Poaceae)狗牙根属(*Cynodon* Rich.)多年生草本植物,是一种在世界温暖区域广泛使用的暖季型草坪草。狗牙根的综合抗逆性强,在运动场、水利边坡、公共绿地、盐碱地等区域的绿化和生态修复中应用广泛^[18]。并且,狗牙根的抗盐性强,在绿化和生态修复中具有巨大的应用潜力^[19]。笔者在前期研究中发现,虽然狗牙根的抗盐性较强,但是在重度盐胁迫下仍会受到盐害,表现为生长量减少、叶片黄化、体内Na⁺和Cl⁻含量升高、K⁺含量降低等^[19]。另外,狗牙根对氮素比较敏感,氮肥是影响狗牙根生长和草坪质

量的重要肥料^[20]。研究氮肥对狗牙根抗盐性的影响对于探究盐碱地中狗牙根的栽培管理具有重要意义。Shao 等^[21]的研究结果显示:适当减少氮用量可以缓解 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫下狗牙根品种‘Wrangle’受到的生长和生理伤害,降低其叶片和茎的 Na⁺ 含量;Ramakrishnan 等^[22]发现,在盐碱胁迫下,增加氮施用量能够促进来源于正常土壤的狗牙根生态型生长,而对来源于盐碱地的狗牙根生态型生长则无影响。上述研究表明:氮对狗牙根抗盐性的影响效应与氮浓度和狗牙根的基因型有关,但关于氮素形态对狗牙根抗盐性的影响尚不清楚,不利于狗牙根在盐碱地建植养护过程中氮肥的选择和高效利用。另外,过酸或过碱条件会抑制植物生长,为了探明不同氮素形态对狗牙根生长影响的差异究竟是氮素形态造成的还是 pH 值变化造成的,本研究使用 pH 缓冲剂 2-(*N*-吗啡啉)乙磺酸(MES)调节培养液的 pH 值。

为明确不同氮素形态对狗牙根抗盐性的影响,以及在盐碱地大面积推广应用的抗盐优质国审狗牙根品种‘阳江’(‘Yangjiang’)为实验材料,采用水培法研究 NaCl 胁迫下 pH 值和氮素形态对狗牙根生长和钠钾离子调控的影响,从而更深入地了解氮素形态对狗牙根抗盐性影响的生理机制,为盐碱地狗牙根的栽培管理提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验材料为江苏省中国科学院植物研究所草业研究中心苗圃地的狗牙根品种‘阳江’。该品种具有密度高、生长速度快、匍匐性强、草坪质量高、耐瘠薄、耐践踏、抗盐性强等特点,能够在重度盐胁迫土壤中生长并形成优质草坪,已经在盐碱地、热带珊瑚岛礁、运动场、水利边坡等地大规模推广应用^[23-26]。

栽培实验在江苏省中国科学院植物研究所温室完成。实验期间温室内平均最高气温 30.4 °C,平均最低气温 22.6 °C,平均光照时间约 13 h · d⁻¹,平均日最大光照强度约 1 300 μmol · m⁻² · s⁻¹。

1.2 方法

1.2.1 材料培养及处理方法 于 2021 年 7 月 20 日,随机剪取新生匍匐茎(带 1 个节的顶芽),用海绵包裹后扦插入泡沫板(具 60 孔)中,每孔 1 株,用装有自来水的周转箱(长 66.5 cm、宽 45.5 cm、高 17.0 cm)进

行生根培养。待新根长出后(1 周),选择枝条长度(约 8 cm)和根系长度(约 4 cm)基本一致的植株,重新种植于泡沫板中,用装有 2.5 L 1/2 Hoagland 营养液且可不间断通气的塑料桶(桶口径 17 cm、高 15 cm)进行为期 1 周的预培养^[24]。

根据前期研究结果^[19]设置 3 因素 2 水平互作处理,共 8 个处理组。其中,NaCl 处理水平为 0 和 300 mmol · L⁻¹;氮素形态包括硝态氮和铵态氮 2 种,浓度均为 7.5 mmol · L⁻¹(即 1/2 Hoagland 营养液的氮浓度);用 MES 调节培养液的 pH 值,MES 水平设为 0 和 20 mmol · L⁻¹。每个处理 4 个重复,每个重复 3 株样株。处理时,将 1/2 Hoagland 营养液配方进行适当调整,去掉原配方中的 Ca(NO₃)₂和 KNO₃,同时补充 CaCl₂和 KCl,二者在培养液中的终浓度均为 2.5 mmol · L⁻¹,并且,硝态氮处理组加入 NaNO₃,铵态氮处理组加入 NH₄Cl。为减少盐冲击效应,各处理组培养液中 NaCl 浓度每天增加 50 mmol · L⁻¹。实验期间,每周更换 1 次培养液,隔天用去离子水补足消耗的培养液体积。培养液初始 pH 值为 pH 6.0,在每次更换培养液时将 pH 值调到初始值。处理 5 周后结束实验。

1.2.2 培养液 pH 值测定 使用上海雷磁 PHSJ-4A 型实验室 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定培养液 pH 值。

1.2.3 生长指标测定 实验结束时统计样株基部的分枝数,即单株枝条数。将样株的枝条和根拉直,选择样株上从大到小排名前 3 位的枝条和根,用直尺(精度 1 mm)测量枝条和根的长度,结果取平均值。将根和枝条分开,同一处理组的 3 株混匀,依次用自来水和去离子水各清洗 3 遍;于 80 °C 烘箱中烘 48 h 后,使用千分之一电子天平称量枝条和根的干质量。根据测量结果计算植株总干质量(枝条干质量和根干质量的总和)和根冠比(根干质量与枝条干质量的比值)。

1.2.4 根和叶离子含量测定 将干燥的根和叶磨成粉,过 40 目筛,称取约 20 mg 粉末,加入 15 mL 去离子水,沸水浴 1 h 后静置过夜,滤液用 FP6410 型火焰光度计(上海欣益仪器有限公司)测定 Na⁺和 K⁺浓度^[27],并计算 Na⁺和 K⁺含量[离子含量=(离子浓度×提取液体积)/样品干质量]、Na⁺/K⁺比(即同一组织 Na⁺含量与 K⁺含量的比值)和钠钾选择性转运系数(根 Na⁺/K⁺比与叶 Na⁺/K⁺比的比值)^[28]。

1.2.5 叶泌盐能力测定 参照 Marcum 等^[29]的方法测定叶泌盐能力。实验结束前 3 d,用去离子水仔细清洗样株,去除叶表面的盐分;实验结束时,剪取样株的倒三叶,加入 10 mL 去离子水,在 25 °C、200 r·min⁻¹条件下振荡 1 min;使用 FP6410 型火焰光度计测定洗液的 Na⁺和 K⁺浓度。将洗过的叶置于 80 °C 烘箱中烘 48 h,使用千分之一电子天平称量叶干质量。计算叶的 Na⁺和 K⁺分泌量,计算公式为离子分泌量=(离子浓度×洗液体积)/叶干质量,并计算分泌物 Na⁺/K⁺比(即叶 Na⁺分泌量与叶 K⁺分泌量的比值)。

1.3 数据统计与分析

使用 EXCEL 2010 软件对实验数据进行相关计算;使用 SPSS 13.0 软件对实验数据进行 *t* 检验,并对相关指标进行三因素方差分析。

2 结果和分析

2.1 不同处理组培养液 pH 值差异分析

处理 1 周后培养液 pH 值的统计结果(表 1)表明:在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,硝态氮处理组

表 1 不同处理组培养液 pH 值在处理 1 周后的差异($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 1 Difference in pH value of culture solution in different treatment groups after treatment for one week ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 Treatment			pH 值 pH value
A	B	C	
0	0	NH ₄ ⁺ -N	4.03±0.06bA #
0	0	NO ₃ ⁻ -N	9.06±0.25aA #
0	20	NH ₄ ⁺ -N	3.95±0.19bA #
0	20	NO ₃ ⁻ -N	6.92±0.16aB #
300	0	NH ₄ ⁺ -N	4.26±0.22bA
300	0	NO ₃ ⁻ -N	8.46±0.69aA
300	20	NH ₄ ⁺ -N	4.27±0.52bA
300	20	NO ₃ ⁻ -N	6.90±0.21aB

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration (mmol·L⁻¹); B: 2-(*N*-吗啡啉)乙磺酸(MES)浓度 2-(*N*-morpholino)ethanesulfonic acid (MES) concentration (mmol·L⁻¹); C: 氮素形态 Nitrogen form. NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen. 不同小写字母表示在相同 NaCl 和 MES 浓度下不同氮素形态处理间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different nitrogen form treatments under the same NaCl and MES concentrations; 不同大写字母表示在相同 NaCl 浓度和氮素形态下不同 MES 浓度处理间差异显著($P < 0.05$) Different uppercases indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different MES concentration treatments under the same NaCl concentration and nitrogen form; “#”表示在相同氮素形态和 MES 浓度下不同 NaCl 浓度处理间差异不显著“#” indicate that there is no significant difference between different NaCl concentration treatments under the same nitrogen form and MES concentration.

培养液的 pH 值均显著($P < 0.05$)高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和铵态氮下,0 和 20 mmol·L⁻¹MES 处理组间的培养液 pH 值差异不显著,而在相同 NaCl 浓度和硝态氮下,20 mmol·L⁻¹MES 处理组培养液的 pH 值显著低于 0 mmol·L⁻¹MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,不同 NaCl 浓度处理组间的培养液 pH 值差异不显著。

2.2 不同处理组狗牙根生长指标差异分析

2.2.1 枝条生长指标差异分析 统计结果(表 2)表明:在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,铵态氮和硝态氮处理组间的单株枝条数差异多不显著,仅在 300 mmol·L⁻¹NaCl 和 0 mmol·L⁻¹MES 下,硝态氮处理组的单株枝条数显著($P < 0.05$)高于铵态氮处理组。而相同 NaCl 浓度和氮素形态下不同 MES 处理组间以及相同 MES 浓度和氮素形态下不同 NaCl 浓度处理组间的单株枝条数差异不显著。

在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,硝态氮处理组的枝条长度显著高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和铵态氮下,20 mmol·L⁻¹MES 处理组的枝条长度显著高于 0 mmol·L⁻¹MES 处理组;而在相同 NaCl 浓度和硝态氮下,0 和 20 mmol·L⁻¹MES 处理组间的枝条长度差异不显著。在相同 MES 浓度和氮素形态下,300 mmol·L⁻¹NaCl 处理组的枝条长度显著低于 0 mmol·L⁻¹NaCl 处理组。

在 0 mmol·L⁻¹NaCl 和相同 MES 浓度下,硝态氮处理组的枝条干质量显著高于铵态氮处理组;而在 300 mmol·L⁻¹NaCl 和相同 MES 浓度下,2 个氮素形态处理组间的枝条干质量差异不显著。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下,20 mmol·L⁻¹MES 处理组的枝条干质量多显著高于 0 mmol·L⁻¹MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,300 mmol·L⁻¹NaCl 处理组的枝条干质量显著低于 0 mmol·L⁻¹NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表 3)显示:NaCl 浓度、MES 浓度和氮素形态的单一及交互作用对单株枝条数的影响多无统计学意义,仅 NaCl 浓度和氮素形态交互作用对单株枝条数的影响在 0.05 水平具有统计学意义。NaCl 浓度、MES 浓度和氮素形态单一作用对枝条长度和枝条干质量的影响在 0.001 水平具有统计学意义;NaCl 浓度和氮素形态交互作用对枝条长度和枝条干质量的影响分别在 0.01 和 0.001 水平具有统计学意义,MES 浓度和氮素形态交互作用对枝条长度的影响在 0.05 水平具有统计学意义;3 个因子

表2 不同处理组狗牙根生长指标的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 2 Comparison on growth indexes of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. in different treatment groups ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment		单株枝条数 Shoot number per plant	枝条长度/cm Shoot length	枝条干质量/g Dry mass of shoot	根长度/cm Root length	根干质量/g Dry mass of root	植株总干质量/g Total dry mass of plant	根冠比 Root/shoot ratio	
A	B								C
0	0	NH ₄ ⁺ -N	6.1±1.1aA#	25.73±1.22bB*	2.01±0.06bB*	6.82±1.04bB*	0.05±0.02bB#	2.06±0.07bB*	0.025±0.009bA*
0	0	NO ₃ ⁻ -N	5.3±0.7aA#	45.55±4.36aA*	3.31±0.40aA*	13.12±1.55aA*	0.17±0.04aA#	3.47±0.44aA*	0.050±0.007aA*
0	20	NH ₄ ⁺ -N	5.3±1.0aA#	36.42±1.91bA*	3.06±0.11bA*	10.56±1.41aA*	0.10±0.02bA*	3.16±0.13bA*	0.033±0.006bA*
0	20	NO ₃ ⁻ -N	5.4±1.0aA#	48.14±4.94aA*	3.74±0.12aA*	9.31±0.81aB*	0.17±0.01aA*	3.91±0.13aA*	0.047±0.003aA*
300	0	NH ₄ ⁺ -N	5.0±0.7bA	18.13±2.36bB	1.43±0.25aB	9.48±1.50bB	0.06±0.02bB	1.49±0.26aB	0.042±0.010bB
300	0	NO ₃ ⁻ -N	6.4±0.6aA	27.55±2.10aA	1.71±0.41aB	26.40±0.88aB	0.18±0.03aB	1.89±0.42aB	0.113±0.038aA
300	20	NH ₄ ⁺ -N	5.9±1.0aA	22.70±2.46bA	2.14±0.08aA	18.90±2.19bA	0.16±0.02bA	2.31±0.09bA	0.076±0.009bA
300	20	NO ₃ ⁻ -N	6.7±1.0aA	30.73±2.48aA	2.37±0.21aA	35.22±1.90aA	0.25±0.02aA	2.62±0.24aA	0.107±0.003aA

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$); B: 2-(*N*-吗啡啉)乙磺酸(MES)浓度 2-(*N*-morpholino) ethanesulfonic acid (MES) concentration ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$); C: 氮素形态 Nitrogen form. NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen. 同列中不同小写字母表示在相同 NaCl 和 MES 浓度下不同氮素形态处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different nitrogen form treatments under the same NaCl and MES concentrations; 同列中不同大写字母表示在相同 NaCl 浓度和氮素形态下不同 MES 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different MES concentration treatments under the same NaCl concentration and nitrogen form; 同列中“*”和“#”分别表示在相同氮素形态和 MES 浓度下不同 NaCl 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) 和不显著“*”和“#” in the same column indicate that there are significant ($P < 0.05$) and no significant differences between different NaCl concentration treatments under the same nitrogen form and MES concentration, respectively.

表3 不同因子对狗牙根生长指标影响的三因素方差分析¹⁾Table 3 Three-factor analysis of variance of the effects of different factors on growth indexes of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.¹⁾

因子 Factor	各生长指标的 <i>F</i> 值 <i>F</i> value of each growth index						
	单株枝条数 Shoot number per plant	枝条长度 Shoot length	枝条干质量 Dry mass of shoot	根长度 Root length	根干质量 Dry mass of root	植株总干质量 Total dry mass of plant	根冠比 Root/shoot ratio
A	2.25	182.25 ***	167.94 ***	572.52 ***	22.26 ***	136.85 ***	74.56 ***
B	0.11	25.04 ***	68.01 ***	75.16 ***	43.63 ***	70.07 ***	2.60
C	1.52	135.87 ***	51.29 ***	333.27 ***	126.95 ***	60.89 ***	43.37 ***
A×B	2.24	1.72	0.08	76.20 ***	9.86 **	0.00	1.15
A×C	4.61 *	11.24 **	18.16 ***	180.95 ***	0.50	15.43 ***	8.88 **
B×C	0.04	5.10 *	3.77	15.05 ***	4.58 *	4.11	5.95 *
A×B×C	1.52	2.54	2.66	11.01 **	0.10	2.44	1.77

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration; B: 2-(*N*-吗啡啉)乙磺酸浓度 2-(*N*-morpholino) ethanesulfonic acid concentration; C: 氮素形态 Nitrogen form. *, **, ***: 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平具有统计学意义 Representing the statistical significances at 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

交互作用对枝条长度和枝条干质量的影响无统计学意义。

2.2.2 根生长指标差异分析 统计结果(表2)表明:在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,硝态氮处理组的根长度多显著高于铵态氮处理组,仅在 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 和 20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 下,硝态氮处理组的根长度低于铵态氮处理组,但差异不显著。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下,0 和 20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 处理组间的根长度差异显著,并且,20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 处理组的根长度多显著高于 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 处理组,在 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 和硝态氮下显著低于 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,300

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理组的根长度显著高于 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理组。

在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,硝态氮处理组的根干质量显著高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下,20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 处理组的根干质量多显著高于 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 处理组。在 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 和相同氮素形态下,0 和 300 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理组间的根干质量差异不显著;而在 20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 和相同氮素形态下,300 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理组的根干质量显著高于 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表3)显示:NaCl 浓度、MES 浓度和氮素形态的单一及交互作用对根长度的

影响多在 0.001 水平具有统计学意义, 仅 3 个因子交互作用对根长度的影响在 0.01 水平具有统计学意义。NaCl 浓度、MES 浓度和氮素形态单一作用对根干质量的影响在 0.001 水平具有统计学意义; NaCl 浓度和 MES 浓度交互作用以及 NaCl 浓度和氮素形态交互作用对根干质量的影响分别在 0.01 和 0.05 水平具有统计学意义; 3 个因子交互作用对根干质量的影响无统计学意义。

2.2.3 植株总干质量差异分析 统计结果(表 2)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 硝态氮处理组的植株总干质量多显著高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组的植株总干质量多显著高于 0 mmol · L⁻¹ MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的植株总干质量显著低于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表 3)显示: NaCl 浓度、MES 浓度和氮素形态单一作用对植株总干质量的影响在 0.001 水平具有统计学意义; NaCl 浓度和氮素形态交互作用对植株总干质量的影响在 0.001 水平具有统计学意义; 3 个因子交互作用对植株总干质量的影响无统计学意义。

2.2.4 根冠比差异分析 统计结果(表 2)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 硝态氮处理组的根冠比显著高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的根冠比差异多不显著, 仅在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 和铵态氮下, 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组的根冠比显著高于 0 mmol · L⁻¹ MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的根冠比显著高于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表 3)显示: NaCl 浓度和氮素形态单一作用对根冠比的影响在 0.001 水平具有统计学意义; NaCl 浓度和氮素形态交互作用以及 MES 浓度和氮素形态交互作用对根冠比的影响分别在 0.01 和 0.05 水平具有统计学意义; 3 个因子交互作用对根冠比的影响无统计学意义。

2.3 不同处理组狗牙根钠钾离子调控差异分析

2.3.1 根钠钾离子含量和比值差异分析 统计结果(表 4)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 硝态氮处理组的根 Na⁺ 含量多显著 ($P < 0.05$) 高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20

mmol · L⁻¹ MES 处理组间的根 Na⁺ 含量差异多不显著, 仅在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 和铵态氮下, 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组的根 Na⁺ 含量显著高于 0 mmol · L⁻¹ MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的根 Na⁺ 含量显著高于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

统计结果(表 4)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 铵态氮和硝态氮处理组间的根 K⁺ 含量差异多不显著, 仅在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 和 20 mmol · L⁻¹ MES 下硝态氮处理组的根 K⁺ 含量显著低于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的根 K⁺ 含量差异不显著。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 0 和 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组间的根 K⁺ 含量差异多不显著, 仅在 20 mmol · L⁻¹ MES 和铵态氮下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的根 K⁺ 含量显著低于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

统计结果(表 4)表明: 在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 和相同 MES 浓度下, 硝态氮处理组的根 Na⁺/K⁺ 比显著高于铵态氮处理组; 而在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 和相同 MES 下, 铵态氮和硝态氮处理组间的根 Na⁺/K⁺ 比差异不显著。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的根 Na⁺/K⁺ 比差异不显著。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的根 Na⁺/K⁺ 比显著高于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表 5)显示: NaCl 浓度和氮素形态单一作用对根 Na⁺ 含量的影响在 0.001 水平具有统计学意义; NaCl 浓度和氮素形态交互作用对根 K⁺ 含量的影响在 0.05 水平具有统计学意义; NaCl 浓度单一作用对根 Na⁺/K⁺ 比的影响在 0.001 水平具有统计学意义; 3 个因子交互作用对根 Na⁺ 和 K⁺ 含量及 Na⁺/K⁺ 比的影响无统计学意义。

2.3.2 叶钠钾离子含量和比值差异分析 统计结果(表 4)表明: 在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 和相同 MES 浓度下, 硝态氮处理组叶 Na⁺ 含量显著高于铵态氮处理组; 在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 和 0 mmol · L⁻¹ MES 下, 铵态氮和硝态氮处理组间的叶 Na⁺ 含量差异不显著, 而在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 和 20 mmol · L⁻¹ MES 下, 硝态氮处理组的叶 Na⁺ 含量显著低于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的叶 Na⁺ 含量差异多不显著, 仅在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 和铵态氮下, 20 mmol · L⁻¹ MES 处理

组的叶 Na⁺含量显著高于 0 mmol · L⁻¹MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,300 mmol · L⁻¹NaCl 处理组的叶 Na⁺含量显著高于 0 mmol · L⁻¹NaCl 处理组。

统计结果(表 4)表明:在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,铵态氮和硝态氮处理组间的叶 K⁺含量差异多不显著,仅在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和 20 mmol · L⁻¹MES 下,硝态氮处理组的叶 K⁺含量显著低于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下,0 和 20 mmol · L⁻¹MES 处理组间的叶 K⁺含量差异多不显著,仅在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和铵态氮下,20 mmol · L⁻¹MES 处理组的叶 K⁺含量显著高于

0 mmol · L⁻¹MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,0 和 300 mmol · L⁻¹NaCl 处理组间的叶 K⁺含量差异多不显著,仅在 20 mmol · L⁻¹MES 和铵态氮下,300 mmol · L⁻¹NaCl 处理组的叶 K⁺含量显著高于 0 mmol · L⁻¹NaCl 处理组。

统计结果(表 4)表明:在 0 mmol · L⁻¹NaCl 和相同 MES 浓度下,硝态氮处理组的叶 Na⁺/K⁺比显著高于铵态氮处理组;在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和 0 mmol · L⁻¹MES 下,铵态氮和硝态氮处理组间的叶 Na⁺/K⁺比差异不显著,而在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和 20 mmol · L⁻¹MES 下,硝态氮处理组的叶 Na⁺/K⁺比显著低于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下,0 和

表 4 不同处理组狗牙根钠钾离子含量及比值的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Comparison on sodium and potassium ion contents and ratios of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. in different treatment groups ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment			根 Na ⁺	根 K ⁺	根 Na ⁺ /K ⁺ 比	叶 Na ⁺	叶 K ⁺	叶 Na ⁺ /K ⁺ 比	钠钾选择性转运系数
			含量/(mmol · kg ⁻¹)	含量/(mmol · kg ⁻¹)	Na ⁺ /K ⁺ ratio of root	含量/(mmol · kg ⁻¹)	含量/(mmol · kg ⁻¹)	Na ⁺ /K ⁺ ratio of leaf	Selective transport coefficient of sodium and potassium
A	B	C	Na ⁺ content in root	K ⁺ content in root		Na ⁺ content in leaf	K ⁺ content in leaves		
0	0	NH ₄ ⁺ -N	48.7±20.0bB *	325.0±78.8aA #	0.15±0.06bA *	24.5±15.5bA *	589.3±73.9aA #	0.04±0.02bA *	3.61±2.54aA *
0	0	NO ₃ ⁻ -N	148.7±55.2aA *	323.7±134.9aA #	0.46±0.31aA *	54.7±12.8aA *	586.2±39.4aA #	0.09±0.02aA *	4.92±2.93aA #
0	20	NH ₄ ⁺ -N	93.9±22.2bA *	394.7±84.8aA *	0.24±0.11bA *	41.3±10.2bA *	591.4±54.3aA *	0.07±0.02bA *	3.40±1.82bA *
0	20	NO ₃ ⁻ -N	174.6±29.4aA *	217.4±75.6bA #	0.80±0.14aA *	65.5±13.1aA *	597.9±218.4aA #	0.11±0.02aA *	7.33±2.30aA #
300	0	NH ₄ ⁺ -N	621.6±34.4bA	223.5±63.2aA	2.78±0.65aA	157.5±42.9aB	537.6±47.1aB	0.29±0.07aA	9.49±3.96aA
300	0	NO ₃ ⁻ -N	752.1±85.0aA	315.9±64.7aA	2.38±0.56aA	112.7±23.2aA	525.0±42.8aA	0.21±0.06aA	11.09±4.07aA
300	20	NH ₄ ⁺ -N	580.6±57.8aA	271.4±33.3aA	2.14±0.09aA	233.1±20.9aA	696.4±65.9aA	0.33±0.04aA	6.39±0.97aA
300	20	NO ₃ ⁻ -N	697.6±130.9aA	319.9±75.7aA	2.18±0.96aA	100.3±16.0bA	541.3±54.8bA	0.19±0.03bA	11.77±6.97aA

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration (mmol · L⁻¹); B: 2-(N-吗啡啉)乙磺酸(MES)浓度 2-(N-morpholino) ethanesulfonic acid (MES) concentration (mmol · L⁻¹); C: 氮素形态 Nitrogen form. NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen. 同列中不同小写字母表示在相同 NaCl 和 MES 浓度下不同氮素形态处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different nitrogen form treatments under the same NaCl and MES concentrations; 同列中不同大写字母表示在相同 NaCl 浓度和氮素形态下不同 MES 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different MES concentration treatments under the same NaCl concentration and nitrogen form; 同列中“*”和“#”分别表示在相同氮素形态和 MES 浓度下不同 NaCl 浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) 和不显著“*”和“#” in the same column indicate that there are significant ($P < 0.05$) and no significant differences between different NaCl concentration treatments under the same nitrogen form and MES concentration, respectively.

表 5 不同因子对狗牙根钠钾离子含量及比值影响的三因素方差分析¹⁾

Table 5 Three-factor analysis of variance of the effects of different factors on sodium and potassium ion contents and ratios of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.¹⁾

因子 Factor	各生长指标的 F 值 F value of each growth index						
	根 Na ⁺ 含量 Na ⁺ content in root	根 K ⁺ 含量 K ⁺ content in root	根 Na ⁺ /K ⁺ 比 Na ⁺ /K ⁺ ratio of root	叶 Na ⁺ 含量 Na ⁺ content in leaf	叶 K ⁺ 含量 K ⁺ content in leaf	叶 Na ⁺ /K ⁺ 比 Na ⁺ /K ⁺ ratio of leaf	钠钾选择性转运系数 Selective transport coefficient of sodium and potassium
A	567.38 ***	1.29	144.51 ***	185.72 ***	0.24	145.01 ***	15.56 ***
B	0.07	0.02	0.55	8.80 **	2.07	1.14	0.19
C	21.78 ***	0.11	1.08	16.17 ***	1.56	4.61 *	6.47 *
A×B	3.29	0.60	3.70	1.34	1.51	0.42	0.53
A×C	0.53	7.80 *	3.49	57.36 ***	1.70	29.68 ***	0.31
B×C	0.13	3.69	1.58	9.42 **	1.03	2.10	2.54
A×B×C	0.00	1.34	0.46	7.13 *	1.34	1.31	0.31

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration; B: 2-(N-吗啡啉)乙磺酸浓度 2-(N-morpholino) ethanesulfonic acid concentration; C: 氮素形态 Nitrogen form. *, **, ***: 分别表示在 0.05, 0.01 和 0.001 水平具有统计学意义 Representing the statistical significances at 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的叶 Na⁺/K⁺ 比差异不显著。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的叶 Na⁺/K⁺ 比显著高于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表 5)显示: NaCl 浓度和氮素形态单一作用对叶中 Na⁺ 含量的影响在 0.001 水平具有统计学意义, MES 浓度单一作用对叶中 Na⁺ 含量的影响在 0.01 水平具有统计学意义, NaCl 浓度和氮素形态交互作用、MES 和氮素形态交互作用以及 3 个因子交互作用对叶中 Na⁺ 含量的影响分别在 0.001、0.01 和 0.05 水平具有统计学意义; 3 个因子单一及交互作用对叶中 K⁺ 含量的影响无统计学意义; NaCl 浓度和氮素形态单一作用对叶中 Na⁺/K⁺ 比的影响分别在 0.001 和 0.05 水平具有统计学意义, NaCl 浓度和氮素形态交互作用对叶中 Na⁺/K⁺ 比的影响在 0.001 水平具有统计学意义, 3 个因子交互作用对叶中 Na⁺/K⁺ 比无统计学意义。

2.3.3 离子选择性转运差异分析 统计结果(表 4)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 铵态氮和硝态氮处理组间的钠钾选择性转运系数差异多不显著, 仅在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 和 20 mmol · L⁻¹ MES 下, 硝态氮处理组的钠钾选择性转运系数显著高于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的钠钾选择性转运系数差异不显著。在相同 MES 浓度和铵态氮下, 300

mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的钠钾选择性转运系数显著高于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组; 而在相同 MES 浓度和硝态氮下, 0 和 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组间的钠钾选择性转运系数差异不显著。

三因素方差分析结果(表 5)显示: NaCl 浓度和氮素形态单一作用对钠钾选择性转运系数的影响分别在 0.001 和 0.05 水平具有统计学意义, 而 MES 浓度单一作用及 3 个因子交互作用对钠钾选择性转运系数的影响无统计学意义。

2.3.4 泌盐量差异分析 统计结果(表 6)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 硝态氮处理组的叶 Na⁺ 分泌量多显著低于铵态氮处理组, 仅在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 和 20 mmol · L⁻¹ MES 下, 硝态氮处理组的叶 Na⁺ 分泌量高于铵态氮处理组, 但差异不显著。在相同 NaCl 浓度和铵态氮下, 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组的叶 Na⁺ 分泌量显著低于 0 mmol · L⁻¹ MES 处理组; 而在相同 NaCl 浓度和硝态氮下, 0 和 20 mmol · L⁻¹ MES 处理组间的叶 Na⁺ 分泌量差异不显著。在相同 MES 浓度和氮素形态下, 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的叶 Na⁺ 分泌量显著高于 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组。

统计结果(表 6)表明: 在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下, 铵态氮和硝态氮处理组间的叶 K⁺ 分泌量差异多不显著, 仅在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 和 0 mmol · L⁻¹ MES 下, 硝态氮处理组的叶 K⁺ 分泌量显著低于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, 0 和 20

表 6 不同处理组狗牙根叶泌盐量和分泌物 Na⁺/K⁺ 比的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 6 Comparison on salt secretion level and Na⁺/K⁺ ratio of secretion of leaf of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. in different treatment groups ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment			Na ⁺ 分泌量/(mmol · kg ⁻¹) Na ⁺ secretion level	K ⁺ 分泌量/(mmol · kg ⁻¹) K ⁺ secretion level	分泌物 Na ⁺ /K ⁺ 比 Na ⁺ /K ⁺ ratio of secretion
A	B	C			
0	0	NH ₄ ⁺ -N	2.1±0.3aA *	10.4±9.8aA *	0.34±0.21aA *
0	0	NO ₃ ⁻ -N	1.2±0.5bA *	3.0±1.3aA #	0.44±0.13aA *
0	20	NH ₄ ⁺ -N	1.0±0.2aB *	2.8±1.1aA *	0.40±0.12aA *
0	20	NO ₃ ⁻ -N	1.2±0.2aA *	2.3±0.3aA *	0.52±0.10aA *
300	0	NH ₄ ⁺ -N	101.5±18.1aA	60.7±12.7aA	1.74±0.53aB
300	0	NO ₃ ⁻ -N	7.4±4.7bA	5.2±3.5bA	1.56±0.62aA
300	20	NH ₄ ⁺ -N	52.9±7.5aB	10.5±3.6aB	5.52±2.06aA
300	20	NO ₃ ⁻ -N	9.7±1.9bA	7.8±2.8aA	1.36±0.49bA

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration (mmol · L⁻¹); B: 2-(N-吗啡啉)乙磺酸(MES)浓度 2-(N-morpholino) ethanesulfonic acid (MES) concentration (mmol · L⁻¹); C: 氮素形态 Nitrogen form. NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen. 同列中不同小写字母表示在相同 NaCl 和 MES 浓度下不同氮素形态处理间差异显著 (P<0.05) Different lowercases in the same column indicate the significant (P<0.05) differences between different nitrogen form treatments under the same NaCl and MES concentrations; 同列中不同大写字母表示在相同 NaCl 浓度和氮素形态下不同 MES 浓度处理间差异显著 (P<0.05) Different uppercases in the same column indicate the significant (P<0.05) differences between different MES concentration treatments under the same NaCl concentration and nitrogen form; 同列中“*”和“#”分别表示在相同氮素形态和 MES 浓度下不同 NaCl 浓度处理间差异显著 (P<0.05) 和不显著 “*”和“#” in the same column indicate that there are significant (P<0.05) and no significant differences between different NaCl concentration treatments under the same nitrogen form and MES concentration, respectively.

mmol · L⁻¹MES 处理组间的叶 K⁺分泌量差异多不显著,仅在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和铵态氮下,20 mmol · L⁻¹MES 处理组的叶 K⁺分泌量显著低于 0 mmol · L⁻¹MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,300 mmol · L⁻¹NaCl 处理组的叶 K⁺分泌量多显著高于 0 mmol · L⁻¹NaCl 处理组。

统计结果(表 6)表明:在相同 NaCl 浓度和 MES 浓度下,铵态氮和硝态氮处理组间的叶分泌物 Na⁺/K⁺比差异多不显著,仅在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和 20 mmol · L⁻¹MES 下,硝态氮处理组的叶分泌物 Na⁺/K⁺比显著低于铵态氮处理组。在相同 NaCl 浓度和氮素形态下,0 和 20 mmol · L⁻¹MES 处理组间的叶分泌物 Na⁺/K⁺比差异多不显著,仅在 300 mmol · L⁻¹NaCl 和铵态氮下,20 mmol · L⁻¹MES 处理组叶分泌物 Na⁺/K⁺比显著高于 0 mmol · L⁻¹MES 处理组。在相同 MES 浓度和氮素形态下,300 mmol · L⁻¹NaCl 处理组叶分泌物 Na⁺/K⁺比显著高于 0 mmol · L⁻¹NaCl 处理组。

三因素方差分析结果(表 7)显示:3 个因子单一及交互作用对叶 Na⁺和 K⁺分泌量的影响在 0.001 水平具有统计学意义;NaCl 浓度单一作用以及 NaCl 浓度和氮素形态交互作用对叶分泌物 Na⁺/K⁺比的影响在 0.001 水平具有统计学意义,其余因子单一和交互作用对叶分泌物 Na⁺/K⁺比的影响在 0.01 水平具有统计学意义。

表 7 不同因子对狗牙根叶泌盐量和分泌物 Na⁺/K⁺比影响的三因素方差分析¹⁾

Table 7 Three-factor analysis of variance of the effects of different factors on salt secretion level and Na⁺/K⁺ ratio of secretion of leaf of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.¹⁾

因子 Factor	各指标的 F 值 F value of each growth index		
	Na ⁺ 分泌量 Na ⁺ secretion level	K ⁺ 分泌量 K ⁺ secretion level	分泌物 Na ⁺ /K ⁺ 比 Na ⁺ /K ⁺ ratio of secretion
A	269.27 ***	58.68 ***	55.05 ***
B	21.99 ***	42.56 ***	10.62 **
C	186.09 ***	59.66 ***	13.10 **
A×B	19.91 ***	20.95 ***	9.15 **
A×C	182.23 ***	34.42 ***	15.98 ***
B×C	26.35 ***	48.34 ***	12.06 **
A×B×C	24.35 ***	28.64 ***	12.35 **

¹⁾ A: NaCl 浓度 NaCl concentration; B: 2-(N-吗啡啉)乙磺酸浓度 2-(N-morpholino) ethanesulfonic acid concentration; C: 氮素形态 Nitrogen form. *, **, ***: 分别表示在 0.05, 0.01 和 0.001 水平具有统计学意义 Representing the statistical significances at 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

3 讨论和结论

盐胁迫下植物体内的钠钾离子平衡被打破,植物体代谢紊乱,植物生长受到抑制^[30],因此,可以通过生长指标判断植物受到盐伤害的程度。在前期研究中,笔者使用枝条总干质量和根系总干质量等生长指标评价草坪草的抗盐性,认为这些生长指标数值越高,草坪草的抗盐性越强^[31]。与 0 mmol · L⁻¹NaCl 相比,300 mmol · L⁻¹NaCl 下狗牙根的枝条长度和枝叶干质量显著下降,根长度和根干质量多显著升高,说明狗牙根地上部生长在 300 mmol · L⁻¹NaCl 下受到一定的抑制,且地上部对盐胁迫的耐受性弱于根系。另外,本研究还发现,300 mmol · L⁻¹NaCl 下狗牙根叶中 Na⁺含量和 Na⁺/K⁺比显著升高,K⁺含量总体上不同程度下降,这可能是盐胁迫下狗牙根枝叶生长受到抑制的一个主要原因^[32]。

不同氮素形态对植物生长的影响存在差异,例如:硝态氮处理组水稻和旱稻的生长量高于铵态氮处理组,尤其是旱稻^[33];而蓝莓(*Vaccinium* spp.)品种‘Climax’和‘Sharpblue’却在铵态氮处理下生长得更好^[34]。不同氮素形态对植物抗盐性的影响也存在差异^[35-36]。本研究中,0 和 300 mmol · L⁻¹NaCl 下,硝态氮处理组狗牙根的枝条长度、枝条干质量、根长度、根干质量、植株总干质量和根冠比基本上均高于铵态氮处理组,并且,硝态氮和铵态氮处理组间的根长度和根干质量差异基本达到显著水平,说明在本实验条件下狗牙根更喜欢硝态氮,并且在 NaCl 胁迫下硝态氮更有利于提高其抗盐性。

由于硝态氮和铵态氮的物理化学特性不同,植物在吸收 NH₄⁺和 NO₃⁻后,体内的离子平衡将被打破,从而影响其他离子的吸收和积累^[37-38]。本研究中,300 mmol · L⁻¹NaCl 下,硝态氮处理组狗牙根叶 Na⁺和 K⁺含量均低于铵态氮处理组,而根 Na⁺和 K⁺含量却高于铵态氮处理组。研究发现,狗牙根可通过选择性吸收和转运 K⁺抑制 Na⁺向地上部运输,并通过盐腺选择性分泌 Na⁺等途径减少叶中 Na⁺积累并维持 K⁺平衡^[28]。本研究中,硝态氮处理组狗牙根钠钾选择性转运系数高于铵态氮处理组,叶 Na⁺和 K⁺分泌量总体上低于铵态氮处理组,说明硝态氮处理下狗牙根的钠钾选择性转运能力更强,但铵态氮处理下狗牙根盐腺的泌盐能力更强。

植物在吸收不同形态氮素后,根系会释放出不同的离子,如在吸收硝态氮时释放阴离子(如 HCO_3^- 、 OH^-),导致机体碱化,而在吸收铵态氮时释放 H^+ ,导致机体酸化^[13]。本研究使用不同氮素形态培养液培养狗牙根,培养液 pH 值在实验过程中发生了显著变化:在不添加 MES 条件下,硝态氮处理组培养液 pH 值在 1 周后从最初的 pH 6.0 升到 pH 9.0 左右,而铵态氮处理组培养液 pH 值在 1 周后降到 pH 4.0 左右;在添加 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES 条件下,硝态氮处理组培养液的 pH 值在 1 周后接近 pH 7.0,而铵态氮处理组培养液 pH 值在 1 周后降到 pH 4.0 左右。培养液 pH 值从 pH 6.0 升到 pH 9.0 相当于在每升培养液中加入约 10^{-5} mol 的 OH^- ,而培养液 pH 值从 pH 6.0 降到 pH 4.0 则相当于在每升培养液中加入约 10^{-4} mol 的 H^+ ,即本研究中防止酸化需要加入的 MES 量是防止碱化需要加入的 MES 量的 10 倍,因此,在加入等量 MES 后,对铵态氮处理组培养液 pH 值的缓冲效果较硝态氮处理组差。值得注意的是,作者在日常监控时发现加入 MES 后铵态氮处理组培养液 pH 值的下降速率较未添加 MES 的铵态氮处理组低(数据另文发表),说明 MES 能够在一定时间范围内维持培养液 pH 值相对稳定。从枝条长度、枝条干质量、根长度、根干质量和植株总干质量看,在相同 NaCl 浓度和氮素形态下, MES 处理组狗牙根的上述指标总体上显著升高,并且,铵态氮处理组上述指标的升高幅度大于硝态氮处理组,由此推断,在相同氮素浓度下,氮素形态差异导致的 pH 值变化是抑制狗牙根生长的一个重要原因。综上所述,氮素形态对狗牙根生长影响的差异是氮素形态和 pH 值双重作用的结果。鉴于铵态氮处理组狗牙根的盐腺泌盐能力较高,而硝态氮处理组狗牙根的钠钾选择性转运能力较高,可以尝试通过调整铵态氮和硝态氮比例的方式,在保持狗牙根根际 pH 值稳定的同时提高其钠钾选择性转运能力和钠分泌能力,从而提高植株的抗盐性,但关于适宜的铵态氮和硝态氮比例还需要后续实验验证。

综合上述研究结果,NaCl 胁迫下狗牙根会受到一定的伤害,硝态氮能缓解 NaCl 胁迫对狗牙根的伤害程度,添加 MES 能够对 NaCl 胁迫下狗牙根的生长有一定的促进作用,尤其是铵态氮处理组,因此,施用硝态氮或添加 MES 均有利于提高狗牙根的抗盐性,但在施用氮肥时,应综合考虑各方面因子,保持根际中性偏酸的环境。

参考文献:

- [1] 叶刚,杨静,李晓慧,等. NaCl 胁迫下不同耐盐型结缕草根系 Ca^{2+} 和 H^+ 流动及 Ca^{2+} 分布特征[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(3): 75-84.
- [2] HERNÁNDEZ J A. Salinity tolerance in plants: trends and perspectives[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20: 2408.
- [3] HUSSAIN S, HUSSAIN S, ALI B, et al. Recent progress in understanding salinity tolerance in plants: story of Na^+/K^+ balance and beyond[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 160: 239-256.
- [4] 陈静波,牛佳伟,田海燕,等. NaCl 胁迫对杂交狗牙根品种‘苏植 2 号’和‘Tifgreen’生长及 Na^+ 和 K^+ 积累的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(3): 45-51.
- [5] ASHRAF M, ATHAR H R, HARRIS P J C, et al. Some prospective strategies for improving crop salt tolerance[J]. Advances in Agronomy, 2008, 97: 45-110.
- [6] 陈立华,张欢,姚宇圆,等. 盐地碱蓬覆被对滨海滩涂土壤理化性质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 19-27.
- [7] HODSON M J, SMITH M M, WAINWRIGHT S J, et al. The effects of the interaction between salinity and nitrogen limitation in *Agrostis stolonifera* L.[J]. Vegetatio, 1985, 61: 255-263.
- [8] CERESO M, GARCÍA-AUSTÍN P, SERNA D, et al. Kinetics of nitrite uptake by *Citrus* seedlings and inhibitory effects of salinity[J]. Plant Science, 1997, 126: 105-112.
- [9] BOWMAN D C, CRAMER G R, DEVITT D A. Effect of salinity and nitrogen status on nitrogen uptake by tall fescue turf[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29: 1481-1490.
- [10] WANG S, GE S, TIAN C, et al. Nitrogen-salt interaction adjusts root development and ion accumulation of the halophyte *Suaeda salsa*[J]. Plants, 2022, 11: 955.
- [11] SINGH M, SINGH V P, PRASAD S M. Nitrogen alleviates salinity toxicity in *Solanum lycopersicum* seedlings by regulating ROS homeostasis[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 141: 466-476.
- [12] 芦治国,华建峰,殷云龙,等. 盐胁迫下氮素形态对海滨木槿幼苗生长及生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 91-98.
- [13] ZHU Y, DI T, XU G, et al. Adaptation of plasma membrane H^+ -ATPase of rice roots to low pH as related to ammonium nutrition[J]. Plant, Cell and Environment, 2009, 32(10): 1428-1440.
- [14] 陈沂岭,赵学强,张玲玉,等. 铵营养对水稻氮效率和矿质养分吸收的影响[J]. 土壤, 2019, 51(2): 243-250.
- [15] CAMALLE M, STANDING D, JITAN M, et al. Effect of salinity and nitrogen sources on the leaf quality, biomass, and metabolic responses of two ecotypes of *Portulaca oleracea* [J]. Agronomy, 2020, 10: 656.
- [16] COELHO D G, DE SOUZA MIRANDA R, DE OLIVEIRA S, et al. Ammonium nutrition modulates K^+ and N uptake, transport and accumulation during salt stress acclimation of sorghum plants[J].

- Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66 (14): 1991-2004.
- [17] NATHAWAT N S, KUHAD M S, GOSWAMI C L, et al. Interactive effects of nitrogen source and salinity on growth indices and ion content of Indian mustard[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30: 569-598.
- [18] 刘伟, 张新全, WU Y, 等. 狗牙根属植物多样性与品种选育研究概况[J]. 园艺学报, 2003, 30(5): 623-628.
- [19] 陈静波, 刘建秀. 狗牙根抗盐性评价及抗盐机理研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 302-310.
- [20] 彭燕. 氮肥对草坪的影响[J]. 四川农业大学学报, 1997, 15(4): 431-434.
- [21] SHAO A, WANG H, XU X, et al. Moderately reducing nitrogen application ameliorates salt-induced growth and physiological damage on forage bermudagrass[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 896358.
- [22] RAMAKRISHNAN P S, KUMAR R. Adaptive responses of an alkaline soil population of *Cynodon dactylon* (L.) Pers. to NPK nutrition[J]. Journal of Ecology, 1976, 64(1): 187-193.
- [23] 陈静波, 阎君, 姜燕琴, 等. 暖季型草坪草优良选系和品种抗盐性的初步评价[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 107-114.
- [24] 陈静波. 狗牙根种质资源的抗盐性评价、钠钾调控机理研究及利用[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 134-135.
- [25] LI D, CHEN J, ZONG J, et al. Variation in growth response and nitrogen accumulation and partitioning of bermudagrass under low nitrogen levels[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(1a): 654-660.
- [26] 杨向阳, 李丹丹, 刘建秀, 等. 两种暖季型草坪草优良品种耐践踏性评价[J]. 草业科学, 2018, 35(1): 54-62.
- [27] CHEN J, ZONG J, GAO Y, et al. Genetic variation of salinity tolerance in Chinese natural bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) germplasm resources[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science, 2014, 64(5): 416-424.
- [28] CHEN J, ZONG J, LI D, et al. Growth response and ion homeostasis in two bermudagrass (*Cynodon dactylon*) cultivars differing in salinity tolerance under salinity stress[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 65(4): 419-429.
- [29] MARCUM K B, ANDERSON S J, ENGELKE M C. Salt gland ion secretion: a salinity tolerance mechanism among five zoysiagrass species[J]. Crop Science, 1998, 38: 806-810.
- [30] 高永生, 王锁民, 张承烈. 植物盐适应性调节机制的研究进展[J]. 草业学报, 2003, 12(2): 1-6.
- [31] 陈静波, 阎君, 郭海林, 等. 暖季型草坪草大规模种质资源抗盐性评价指标的选择[J]. 草业科学, 2008, 25(4): 95-99.
- [32] HAMEED M, ASHRAF M. Physiological and biochemical adaptations of *Cynodon dactylon* (L.) Pers. from the Salt Range (Pakistan) to salinity stress[J]. Flora, 2008, 203: 683-694.
- [33] 李杰, 林杉. NO_3^- 和 NH_4^+ 对水稻和旱稻生长及水分利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(4): 49-52.
- [34] MERHAUT D J, DARNELL R L. Effects of nitrogen form on vegetative growth, photosynthesis, and effluent pH in 'Climax' and 'Sharpblue' blueberries [J]. HortScience, 1993, 28: 572-576.
- [35] LEWIS O A M, LEIDI E O, LIPS S H. Effect of nitrogen source on growth response to salinity stress in maize and wheat [J]. New Phytologist, 1993, 111: 155-160.
- [36] DE SOUZA MIRANDA R, GOMES-FILHO E, PRISCO J T, et al. Ammonium improves tolerance to salinity stress in *Sorghum bicolor* plants[J]. Plant Growth Regulation, 2016, 78(1): 121-131.
- [37] 王磊, 隆小华, 孟宪法, 等. 不同形态氮素配比对盐胁迫下菊芋幼苗生理的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 255-261.
- [38] 祖庆学, 聂忠扬, 林松, 等. 铵态氮和硝态氮对比对烤烟生长及离子平衡的影响[J]. 作物杂志, 2023, 39(3): 154-158.
- (责任编辑: 佟金凤)

《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流、充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等网络文献资源数据库,凡在本刊发表的论文将编入数据库供上网交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将文章收编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《植物资源与环境学报》的投稿网址为 <http://zwzy.cnbg.net>; 联系电话: 025-84347014; E-mail: zwzybjb@163.com; QQ: 2219161478。

《植物资源与环境学报》编辑部
2024-03