

柴达木盆地尕斯库勒盐湖区盐生植物吸盐效应及其耐盐性评价

余冬梅^{1,2}, 祁兆鑫^{1,2,3}, 胡夏嵩^{1,2,4}, 刘亚斌^{1,2,3}, 杨幼清^{1,2,3}, 李淑霞^{1,2,3}, 王建萍^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘要:选取柴达木盆地尕斯库勒盐湖区作为研究区, 筛选出了9种优势盐生植物, 开展了盐生植物生长区土体颗粒、容重、含水量等物理性质指标, 以及土体中 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 7种易溶盐离子含量试验测试, 分析了区内芦苇、海韭菜等9种盐生植物茎叶和根系部分 HCO_3^- 、 Cl^- 等7种易溶盐离子含量及其分布规律。在此基础上, 探讨了区内9种盐生植物对易溶盐离子吸收作用及其差异性; 采用盐生植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值结果, 定量评价了区内9种盐生植物耐盐性及变化规律。结果表明, 区内9种盐生植物茎叶部分 K^+/Na^+ 比值由大至小依次为: 小花棘豆 0.84、羊齿天门冬 0.58、白刺 0.55、盐地风毛菊 0.52、海韭菜 0.50、无脉苔草 0.47、洽草 0.41、芦苇 0.39 和 赖草 0.34。研究结果可为尕斯库勒盐湖区及其周边地区利用盐生植物改良土壤盐渍化提供理论支撑。

关键词:柴达木盆地; 尕斯库勒盐湖区; 盐生植物; 吸盐效应; K^+/Na^+ 比值; 耐盐性评价

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2020)01-0123-09

土地盐渍化现象已成为影响生态环境和制约区域经济发展的重要因素之一^[1]。全世界盐渍化土壤面积为 $9.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 柴达盆地宜垦殖农地为 $8.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 现有耕地面积为 $4.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中盐渍化面积达 $1.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[2]。近年来, 随着盐湖区周边地区石油资源的勘探开发和利用, 青海格尔木至新疆库尔勒铁路以及花土沟机场等基础设施建设工程的逐渐增多, 使得对原本脆弱的生态环境产生了一定程度影响, 区域水土流失、土地沙漠化等现象不断出现。为了科学有效地抑制这种灾害现象的产生, 开展盐湖区及其周边地区盐生植物吸盐作用和耐盐性等方面的研究, 可对采用盐生植物改良盐渍土提供理论支撑具有实际意义, 同时对进一步开展盐生植物盐

胁迫条件下表现出的耐盐机理研究提供理论依据。

有关盐生植物吸盐效应和耐盐性方面, 国内外学者开展了大量的研究, 取得了丰富的研究成果。不同盐生植物类型所具有的耐盐机理也不相同, 主要的耐盐方式表现为植株形态结构的适应、离子吸收和区隔化、渗透调节、植物内源激素的响应和分子机制等^[3]。辛菊平等^[4]通过对柴达木盆地盐生境下的黑果枸杞进行形态结构研究, 认为黑果枸杞在盐生环境下高度肉质化增加了耐盐能力, 土壤中 Na^+ 离子、 K^+ 离子平均含量为 3.73 cmol/kg 、 4.20 cmol/kg , 以适应干旱和盐碱生境。Moseki 等^[5]、Reda 等^[6]通过对盐爪爪、海马齿、罗勒等植物进行盐胁迫试验, 其茎叶和根系的 Na^+

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572306, 41471454, 41671521); 第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK0805); 青海省创新平台项目(2018-ZJ-T10, 2018-ZJ-T03); 青海省自然科学基金资助项目(2014-ZJ-906)

作者简介: 余冬梅(1986-), 女, 助理研究员, 主要从事地质灾害防治以及环境生态等方面的研究工作。Email: ydm2011@isl.ac.cn。

通信作者: 胡夏嵩(1965-), 男, 教授, 主要从事环境岩土工程与地质工程等方面的教学与科研工作。Email: huxiasong@tsinghua.org.cn。

和 K^+ 的吸收显著。岳利军等^[7]通过对沙芥采用 NaCl 胁迫试验,表明在高浓度 NaCl 胁迫下沙芥通过限制 Na^+ ,增强 K^+ 的选择性吸收和从根向叶选择性运输,从而减缓 Na^+ 对植物毒害。Liang 等^[8]通过在盐碱地农作物生长环境下,分析盐害对农作物的耐盐机理研究,提出植物的耐盐机理是筛选优质农作物的理论基础。杨秀艳等^[9]对唐古特白刺开展 NaCl 溶液胁迫处理,利用 Na^+ 和 Cl^- 进行渗透调节,来维持其地上部分较稳定 K^+/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 比值以适应盐胁迫环境。

国内外学者开展的有关盐生植物吸盐性和降盐效应方面的研究,主要表现在单一植物种耐盐性方面,且运用 NaCl 等溶液胁迫处理,测试植物体内离子含量。本研究对植物耐盐性方面所开展的研究,主要是在柴达木盆地野外自然生长植物耐盐性方面。基于以上实际情况,本项研究选取位于柴达木盆地尕斯库勒盐湖区及其周边地区作为研究区,筛选出了 9 种优势盐生植物,通过测定盐生植物地上茎叶和地下根系部分易溶盐离子含量及其分布规律,采用盐生植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值分析植物的耐盐能力。通过以上研究对研究区及其周边地区,可为采用盐生植物科学有效地防治土地盐渍化,以及防治土地沙化、荒漠化和保护区域生态环境等提供理论指导。

1 试验材料和方法

研究区尕斯库勒盐湖区位于柴达木盆地西缘,地理坐标北纬 $37^{\circ}57' \sim 38^{\circ}15'$,东经 $90^{\circ}35' \sim 91^{\circ}07'$,面积约 800 km^2 ,年均降水量 55.34 mm ,年蒸发量高达 $2\,856.93 \text{ mm}$;隶属于青海省海西蒙古族藏族自治州茫崖镇^[10]。本项研究以尕斯库勒盐湖区及其周边地区生长的芦苇(*Phragmites australis* Trin.)、赖草(*Leymus secalinus* Tzvel.)、海韭菜(*Triglochin maritimum* Linn.)、无脉苔草(*Carex enervis* C. A. Mey.)、洽草(*Koeleria cristata* (L.) Pers.)、盐地风毛菊(*Saussurea salsa* (Pall.) Spreng.)、羊齿天门冬(*Asparagus filicinus* Ham.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)和小花棘豆(*Oxytropis glabra* DC.) 9 种优势盐生植物作为试验供试种,其中白刺为灌木植物,其余 8 种均为多年生草本植物,盐生植物样品均为盐湖区自然生

长状态良好的植物样品。课题组于 2016 年 8 月前往研究区采集盐生植物、植物生长区盐渍土样品;在此基础上,将所采集到的试样及时带回实验室,开展了室内试验测试分析。研究区盐生植物生长区土体物理化学性质指标测试结果如表 1、表 2 所示。区内盐生植物生长区土体不均匀系数 C_u 为 19.97,曲率系数 C_e 为 3.08,以粉粒为主且颗粒较细,表现出粒径大于 0.075 mm 的土粒含量不超过全重的 50%,塑性指数为 $3.9 (<10)$,粒径小于 0.005 mm 的土粒含量不超过全重的 10%,土体类型以砂质粉土为主,含水量为 28.93%,密度为 1.533 g/cm^3 ,土体 pH 值为 7.9,呈弱碱性。

研究区芦苇、海韭菜、赖草等 9 种优势盐生植物地上茎叶和地下根系部分 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 7 种易溶盐离子含量的具体测定方法为,首先将野外采集的 7 种优势盐生植物茎叶和根系部分依次剪断分开,采用蒸馏水冲洗 3~5 遍,以清洗掉附着在植物根系表面盐分和杂质,然后置于烘箱 80°C 烘干至恒重。区内 9 种盐生植物茎叶和根系 7 种易溶盐离子含量的测试方法为,易溶盐总盐测定采用烘干法; HCO_3^- 测定采用双指示剂中和滴定法; Cl^- 测定采用 $AgNO_3$ 滴定法; SO_4^{2-} 测定采用 EDTA 间接滴定法; Na^+ 、 K^+ 测定采用火焰光度法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 测定采用 EDTA 络合滴定法^[11-12]。

2 盐生植物吸盐效应

2.1 盐生植物地上茎叶部分易溶盐离子含量及其特征

对于区内海韭菜、芦苇、赖草等 9 种优势盐生植物,其地上茎叶部分 HCO_3^- 、 Cl^- 等 7 种易溶盐离子含量测定结果及其变化规律如图 1 所示。阴离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 平均含量为 26.10 g/kg 和 28.00 g/kg ,相对高于阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,阳离子平均含量分别为 8.01 、 14.19 、 5.64 、 3.48 g/kg , SO_4^{2-} 含量为 Cl^- 含量的 1.07 倍, Na^+ 平均含量为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 平均含量的 1.77 倍、2.52 倍和 4.08 倍。海韭菜、盐地风毛菊、羊齿

天门冬和白刺等 4 种植物地上茎叶部分 Na^+ 含量分别为 19.25、18.02、24.51、15.97 g/kg,显著高于芦苇、赖草、无脉苔草、洽草和小花棘豆, Na^+ 含量分别为 11.83、11.09、10.94、10.98、10.76 g/kg。此外,羊齿天门冬地上茎叶部分 Na^+ 含量相对较高为 24.51g/kg,小花棘豆相对较低为 10.76 g/kg,羊齿天门冬地上茎叶部分 Na^+ 含量为小花棘豆的 2.28 倍。

表 1 研究区土体物理化学性质指标试验测定结果
Table 1 Physical and chemical indexes of soil in test area

取样 位置	取样深 度/cm	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 /%	孔隙比	塑性 指数	酸碱度 pH	土粒组成/%				土体 类型
							0.25 ~ 2.0	0.075 ~	0.005 ~	<0.005	
							mm	0.25mm	0.075mm	mm	
采油一场	0 ~ 30	1.533	28.93	0.84	3.9	7.90	8.8	43.6	42.0	5.6	砂质粉土

表 2 研究区土体 7 种易溶盐离子含量试验测试结果
Table 2 Test results of seven soluble salt ions content of soil in test area

取样位置	取样 深度 /cm	易溶盐离子含量/ $(g \cdot kg^{-1})$							含盐 量/%	盐渍土 类型	盐渍化 程度
		HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}			
采油 一场	0 ~ 30	0.314	6.108	8.551	0.379	4.912	1.887	0.388	2.264	硫酸—亚硫酸盐渍土	强盐渍土

研究表明,区内海韭菜、盐地风毛菊、白刺和羊齿天门冬等 4 种植物,将其由根系吸收的 Na^+ 区域化至地上茎叶部分液泡中,其肉质化茎叶含有大量薄壁细胞,可贮存大量水分起到降低过高盐离子浓度作用,且吸收积累的 Na^+ 可参与渗透调节,使生长在盐渍生境下的植物免受盐离子的危害,说明离子吸收及区域化作为盐生植物的重要耐盐机制^[13-14]。

已有研究也表明,盐分中的 Na^+ 含量升高会抑制根系对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收和运输,影响植物体内原有的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子平衡^[15]。由图 1 可知,由于 9 种植物地上茎叶部分 Na^+ 含量升高,使得地上茎叶部分 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量显著降低。 K^+ 含量在海韭菜、盐地风毛菊、羊齿天门冬和白刺等 4 种植物地上茎叶的含量亦相对高于其它 5 种植物,即羊齿天门冬茎叶部分 K^+ 含量相对较高为 14.12 g/kg,赖草相对较低为 3.73 g/kg,羊齿天门冬茎叶部分 K^+ 含量为赖草的 3.79 倍。 K^+ 作为植物耐盐能力的关键影响因素,则在盐胁迫条件下 K^+ 优先向植物地上

茎叶部分运输,从而提高其自身的耐盐性^[16],这也说明区内海韭菜、盐地风毛菊、羊齿天门冬和白刺等 4 种盐生植物耐盐性相对显著于芦苇和赖草等盐生植物。 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在海韭菜、盐地风毛菊和小花棘豆地上茎叶中的含量相对较高,即海韭菜相对较高为 7.40 g/kg 和 10.66 g/kg,而白刺相对较低为 0.58 g/kg 和 0.95 g/kg,其原因主要为 Mg^{2+} 为植物进行光合作用不可少的离子,而 Ca^{2+} 与植物新陈代谢密切相关^[17]。

由图 1 可知,区内 9 种盐生植物对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的选择吸收能力相对强于其它离子,对 HCO_3^- 的吸收能力相对较弱, Cl^- 和 SO_4^{2-} 作为植物必需的微量成分对植物正常生长发育起到重要作用。海韭菜、盐地风毛菊、羊齿天门冬等 3 种植物其茎叶部分 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量较芦苇等其它 6 种植物要高,海韭菜地上茎叶 Cl^- 含量相对较高为 58.72 g/kg,无脉苔草相对较低为 11.82 g/kg; SO_4^{2-} 在小花棘豆地上茎叶部分含量相对较高为 67.98 g/kg,白刺相对较低为 2.82 g/kg。

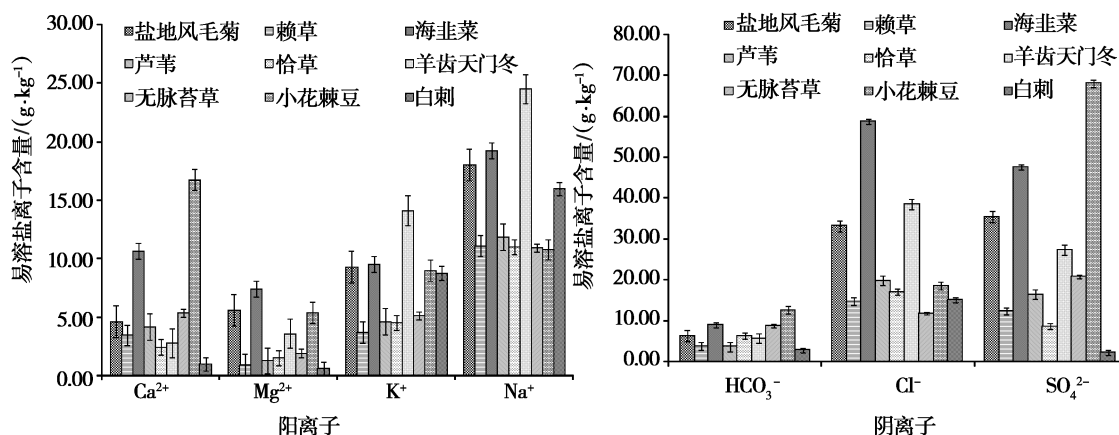


图 1 研究区 9 种优势盐生植物地上茎叶部分 7 种易溶盐离子含量分布特征

Fig. 1 Distribution features of ions content of seven soluble salts in the above-ground part of nine halophytes in test area

2.2 盐生植物地下根系部分盐分含量及其特征

区内海韭菜、芦苇、赖草等 9 种优势盐生植物地下根系部分 7 种易溶盐离子含量测定结果及其变化规律如图 2 所示。与地上茎叶部分相类似，海韭菜、芦苇、赖草等 9 种植物地下根系中阴离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 平均含量为 21.64 g/kg 和 12.64 g/kg，相对明显高于阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 平均含量，分别为 5.97、11.39、2.47、1.29 g/kg， Cl^- 含量为 SO_4^{2-} 含量的 1.71 倍， Na^+ 平均含量为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 平均含量的 1.91 倍、4.61 倍和 5.94 倍。

区内芦苇和赖草将吸收的大量 Na^+ 区域化在根系中， Na^+ 含量相对较高分别为 12.81 g/kg 和 18.94 g/kg，海韭菜、羊齿天门冬和白刺等 3 种植物地下根系中 Na^+ 含量则显著低于芦苇和赖草等 6 种植物，白刺相对较低为 3.50 g/kg，为其地上部分的 0.22 倍。此外，由于 Na^+ 过多的吸收亦会对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收产生拮抗作用^[18]，故区内 9 种植物地下根系部分 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量明显降低， K^+ 含量相对较高，即小花棘豆地下根系中 K^+ 吸收量相对较高为 8.69 g/kg，而赖草相对较低为 2.53 g/kg。无脉苔草根 Mg^{2+} 含量相对较高为 3.39 g/kg，白刺相对较低为 0.37 g/kg。 Ca^{2+} 以羊齿天门冬根系中含量相对较高为 3.11 g/kg，白刺根系中相对较低为 1.23 g/kg。 Cl^- 在赖草根系中含量相对较高为 29.55 g/kg，白刺相对较低为 6.52 g/kg。 SO_4^{2-} 的

积累量与 Na^+ 的积累量差异不大，与 Cl^- 的吸收相类似亦以赖草相对较高为 23.20 g/kg，白刺相对较低为 1.10 g/kg。 HCO_3^- 含量差异相对不显著。

区内 9 种盐生植物对 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的吸收能力相对较强，海韭菜、芦苇、赖草、恰草、盐地风毛菊、羊齿天门冬和白刺等 6 种盐生植物中 Cl^- 含量高于 SO_4^{2-} 含量， $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 值分别为 0.67、0.69、0.80、0.45、0.90、0.55、0.16，其变化范围为 0.25 ~ 1.00，按阴离子类型划分属于 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^-$ 型盐生植物^[17]；而区内无脉苔草和小花棘豆 SO_4^{2-} 含量高于 Cl^- 含量， $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 值分别为 1.88 和 1.91，其变化为 1 ~ 4 之间，按阴离子类型划分属于 $\text{Cl}^--\text{SO}_4^{2-}$ 型盐生植物^[19]，这说明区内不同类型植物对不同盐离子的吸收具有选择性。杜利霞等^[20] 通过对赖草采用 8 种浓度梯度 NaCl 溶液进行胁迫，试验结果表明赖草通过根系限制 Na^+ 向茎叶运输，即通过根系拒盐以减轻或避免 Na^+ 对地上茎叶部分的伤害。Kobayashi 等^[21] 对小花碱茅采用 4 种浓度梯度 NaCl 溶液进行胁迫，试验结果表明小花碱茅在盐胁迫下通过根系拒 Na^+ ，以确保其地上部分含有较高 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 值来适应盐胁迫。赵可夫等^[22] 的研究亦表明芦苇在盐渍条件下其地上部分是拒 Na^+ 的，即通过根系限制 Na^+ 侵入地上部分。上述学者得到的相关研究结果与本研究结果基本相类似。

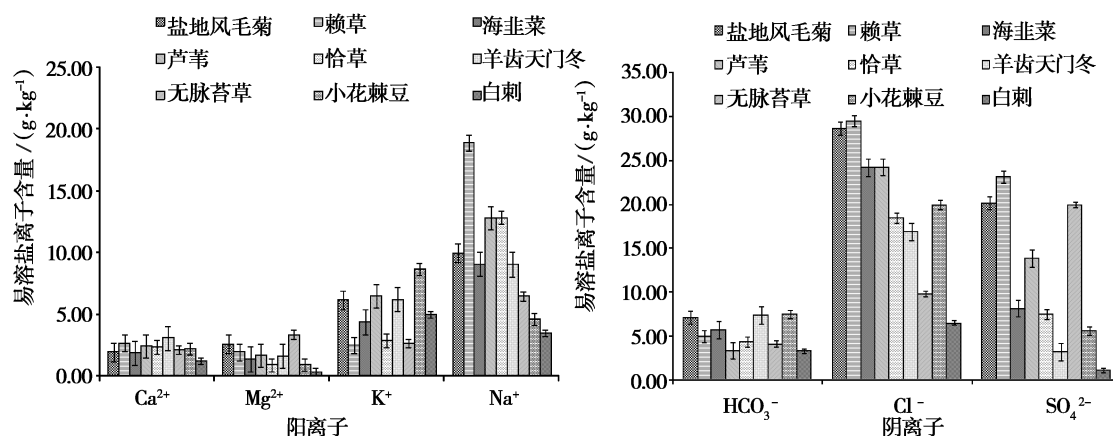


图2 研究区9种优势盐生植物地下根系部分7种易溶盐离子含量分布特征

Fig. 2 Distribution features of ions content of seven soluble salts in the underground part of nine halophytes in test area

地下部分承担了离子的吸收和转运功能,其效率受到多种因素的影响,地上部分很大程度上只承担运输与分配功能,而不具备离子吸收能力。盐生植物覆盖地表,以其蒸腾作用代替土壤蒸发,从而一定程度地抑制了土壤返盐;同时,盐生植物生长活动过程中,根据水盐运移规律,根系吸收水分的同时需从土壤中吸收盐分并在体内积累,降低了根系活动范围内的盐分,从而有利于土壤脱盐和改善盐渍化程度^[23]。土壤水盐运移过程和运移机理研究属于盐渍土研究的核心问题^[24],土壤盐分的运移和积累是特定气候、母质、地形和水文等自然条件以及人类活动的产物^[25],研究不同盐生植物类型对土壤剖面盐分积累和离子迁移的影响,可为盐碱地利用和盐生植物改良盐渍土效果提供科学依据。

3 盐生植物耐盐性及其评价

3.1 耐盐性评价原则

植物耐盐性为植物体内一系列生理生化过程综合作用的结果,是多基因控制的数量遗传性状,不同植物耐盐性存在较大差异,且耐盐机制各不相同^[26]。耐盐性评价为植物对盐分胁迫下的耐盐能力的最终体现,属于植物耐盐育种和耐盐机理研究基础性工作,对盐生植物资源合理开发利用及盐碱地生物改良治理具有重要意义。本研究对植物耐盐性评价的基本原则有二:第一,通过

分析区内9种植物地上茎叶和地下根系部分7种易溶盐离子含量及其变化规律,评价区内不同植物对7种易溶盐离子的吸收作用;第二,在测定区内9种植物地上茎叶部分7种易溶盐离子含量基础上,采用盐生植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值来评价区内9种植物的耐盐性。

3.2 耐盐性评价法

1) 地上茎叶和地下根系部分易溶盐离子评价法

盐生植物能改善盐渍化土壤归因于生长在盐渍生境下盐生植物能吸收土壤中的盐分,不同类型盐生植物对盐分吸收具有选择性,盐分在植物地上茎叶和地下根系中积累量可反映植物对盐胁迫的忍耐能力,盐生植物地上茎叶和地下根系中吸收盐分愈多,在一定程度上表明盐生植物对盐渍环境具有更强耐盐能力^[21,26]。

本研究通过测定区内9种盐生植物地上茎叶和地下根系部分7种易溶盐离子含量,并对9种盐生植物茎叶和根系部分7种易溶盐离子含量求和,得出9种盐生植物体内含盐量,利用体内含盐量高低对9种植物进行耐盐能力评价,即植物体内含盐量愈高,其耐盐能力相对愈强^[26]。

2) K^+/Na^+ 比值评价法

已有研究结果表明, K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值可用来表征盐胁迫对离子平衡破坏的程度,其比值愈低,表明 Na^+ 对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收抑制效应愈强,受盐害程度则愈严

重^[27]。 Na^+ 是造成植物盐害及产生盐渍生境的主要离子, K^+ 是植物生长发育所必需的大量元素和重要的渗透调节组分。由于两种离子半径和水合能(Ion hydration energy)相似, Na^+ 对 K^+ 吸收呈现出明显竞争性抑制作用,故盐碱化土壤作物会受到 Na^+ 危害和 K^+ 亏缺的双重伤害,对它们选择程度高低成为影响植物抗盐能力强弱的一个重要因素^[28]。

植物体内 Na^+ 含量的提高, K^+ 含量和 K^+/Na^+ 比值的降低为常见胁迫反应现象,同时 K^+/Na^+ 比值大小为评价不同植物耐盐性重要指标^[29]。植物细胞中 K^+ 和 Na^+ 一般处于稳定动态平衡,即一般细胞质中 K^+/Na^+ 比值较小值为1.00左右,而在盐胁迫下则低于1.00,植物保持茎叶部分相对较高的 K^+/Na^+ 比值能反映植物具有相对较高耐盐性^[30]。因此,本研究采用植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值方法,对区内9种盐生植物的耐盐性大小进行评价。

3.3 区内优势盐生植物耐盐性评价结果

1)研究区植物地上茎叶和地下根系易溶盐离子含量

区内海韭菜、芦苇等9种植物地上茎叶部分 HCO_3^- 、 Cl^- 等7种易溶盐离子含量和含盐量试验结果如图1所示。区内9种植物地上茎叶部分含盐量由大至小依次为海韭菜、小花棘豆、羊齿天门冬、盐地风毛菊、无脉苔草、芦苇、洽草、赖草和白刺,其体内含盐量依次分别为162.17、116.55、141.19、112.46、64.63、61.83、61.53、50.20和6.49 g/kg。

区内海韭菜、芦苇和赖草等9种盐生植物地下根系部分 HCO_3^- 、 Cl^- 等7种易溶盐离子含量和含盐量试验结果如图2所示。9种盐生植物地下根系部分含盐量由大至小依次为赖草、盐地风毛菊、芦苇、海韭菜、小花棘豆、洽草、无脉苔草、羊齿天门冬和白刺,其体内含盐量依次分别为83.87、76.85、65.00、54.93、49.62、49.42、48.66、47.58、和21.03 g/kg。

对区内海韭菜、芦苇、赖草等9种植物地上茎叶和地下根系部分含盐量求和,其含盐量由大至小依次为海韭菜、小花棘豆、盐地风毛菊、羊齿天门冬、赖草、芦苇、无脉苔草、洽草和白刺,其含盐

量由大至小依次为217.10、190.81、189.31、164.13、134.07、126.83、113.29、100.95、67.52 g/kg。区内9种盐生植物耐盐能力由大至小依次为海韭菜、小花棘豆、盐地风毛菊、羊齿天门冬、赖草、芦苇、无脉苔草、洽草和白刺。

2) K^+/Na^+ 比值评价结果

通过试验测得区内海韭菜、芦苇和赖草等9种盐生植物地上茎叶和地下根系部分7种易溶盐离子含量基础上,计算得到海韭菜、芦苇和赖草等9种植物地上茎叶和地下根系部分 K^+/Na^+ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值,结果如表3所示。区内9种盐生植物地上茎叶和地下根系部分 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值整体低于1.00,总体反映出地上部分高于地下部分,表明在区内盐胁迫生境下,高浓度的 Na^+ 含量导致对植物 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收产生抑制,使得植物体内 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值降低,盐胁迫使植物体内的离子平衡受到一定程度影响和破坏。在盐渍生境下盐生植物维持相对较高的 K^+ 含量和吸收足够的 Na^+ (和 Cl^-),作为维持渗透调节和细胞膨压的要求,这也是盐生植物适应盐生环境的重要原因^[31]。

由表3可知,区内海韭菜、芦苇和赖草等9种盐生植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 值由大至小依次为小花棘豆、羊齿天门冬、白刺、盐地风毛菊、海韭菜、无脉苔草、洽草、芦苇和赖草,其地上茎叶部分 K^+/Na^+ 值由大至小依次为0.84、0.58、0.55、0.52、0.50、0.47、0.41、0.39和0.34;同时,羊齿天门冬、白刺、盐地风毛菊和海韭菜地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值相对较高,分别为0.58、0.55、0.52和0.5,即耐盐性较强,而芦苇和赖草地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值相对较低,分别为0.39和0.34。区内9种盐生植物耐盐能力由大至小依次为小花棘豆、羊齿天门冬、白刺、盐地风毛菊、海韭菜、无脉苔草、洽草、芦苇和赖草。李品芳等^[32]通过对苇状羊茅采用8种浓度梯度进行胁迫试验,在胁迫后第36d苇状羊茅地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值随着盐胁迫浓度梯度增加,地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值呈降低趋势且逐渐小于1.00。该研究与本项研究中9种盐生植物在盐渍生境下地上茎叶部分 K^+/Na^+ 值低于1.00相类似。

表 3 研究区 9 种盐生植物体内 K^+/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 比值计算结果

Table 3 Calculation results of K^+/Na^+ , Mg^{2+}/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ values of nine halophytes in test area

植物名称	K^+/Na^+		Mg^{2+}/Na^+		Ca^{2+}/Na^+	
	地上部分	地下部分	地上部分	地下部分	地上部分	地下部分
海韭菜	0.50	0.48	0.38	0.15	0.55	0.21
芦 苇	0.39	0.51	0.11	0.13	0.35	0.19
无脉苔草	0.47	0.41	0.17	0.52	0.49	0.33
赖 草	0.34	0.13	0.08	0.10	0.31	0.14
洽 草	0.41	0.23	0.13	0.07	0.22	0.18
盐地风毛菊	0.52	0.62	0.31	0.26	0.25	0.20
羊齿天门冬	0.58	0.69	0.15	0.18	0.11	0.34
小花棘豆	0.84	1.89	0.50	0.21	1.56	0.48
白 刺	0.55	1.43	0.04	0.11	0.06	0.35

有关盐生植物耐盐机制较为复杂,同时需考虑的评价指标亦较多。刘金林等^[33]对浙江楠和刨花楠的 2 种楠木的生长量、相对地径生长量、生物量、叶绿素含量、叶片相对含水量、幼苗的电导率、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、脯氨酸含量进行耐盐性综合评价。郝金标等^[34]指出耐盐性是指植物允许盐分进入体内,但它们可通过不同的生理途径忍受或部分忍受盐分对它们的作用而不受伤害而维持了正常的生理活动。高航等^[35]通过对白刺中不同部位的元素含量分析发现,各部位中常量元素以钠为最高,依次为钾、钙、镁。本项研究主要是通过区内盐生植物地上茎叶和地下根系易溶盐离子含量,以及盐生植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值结果,定量评价了区内 9 种盐生植物耐盐性及变化规律。鉴于此,本项研究在后续研究中有关盐生植物耐盐性机制等方面的研究有待于进一步深入,例如进一步开展盐生植物生理指标及其变化规律等方面的研究,探讨盐生植物的耐盐性及其特征。

4 结 论

1)区内 9 种盐生植物地上茎叶和地下根系部分 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 含量相对明显高于 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,地上茎叶部分 SO_4^{2-} 平均含量

为 Cl^- 平均含量的 1.07 倍, Na^+ 平均含量为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 平均含量的 1.77 倍、2.52 倍和 4.08 倍。地下根系部分 Cl^- 平均含量为 SO_4^{2-} 平均含量的 1.71 倍, Na^+ 平均含量为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 平均含量的 1.91 倍、4.61 倍和 5.94 倍。

2)9 种盐生植物地上茎叶部分 K^+/Na^+ 比值由大至小依次为小花棘豆 0.84、羊齿天门冬 0.58、白刺 0.55、盐地风毛菊 0.52、海韭菜 0.50、无脉苔草 0.47、洽草 0.41、芦苇 0.39 和赖草 0.34,即耐盐能力由大至小依次为小花棘豆、羊齿天门冬、白刺、盐地风毛菊、海韭菜、无脉苔草、洽草、芦苇和赖草。

3)海韭菜、芦苇和赖草其地上茎叶和地下根系部分 7 种易溶盐离子含量表现出相类似分布规律,即 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 含量在 3 种植物地上茎叶和地下根系部分中的含量均相对较高。3 种植物地上部分 K^+/Na^+ 比值均小于 1.00,且由大至小依次为海韭菜、芦苇和赖草,即反映出海韭菜耐的盐能力相对较为显著,其次为芦苇,赖草耐盐能力相对不及前者。

参考文献:

[1] 张建锋. 盐碱地生态修复原理与技术[M]. 北京:中国林业出版社,2007.

[2] 青海农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京:农业出版

- 社,1997:371.
- [3] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3): 324–349.
- [4] 辛菊平, 朱春云. 柴达木盆地不同盐生境下黑果枸杞形态结构比较[J]. *西部林业研究*, 2015, 44(4): 73–78.
- [5] Moseki B, Buru J C. Ionic and water relations of *Sesuvium portu-lacastrum* (L.) [J]. *Scientific Research and Essays*, 2010, 5(1): 35–40.
- [6] Moghaieb R E A, Saneoka H, Fujita K. Effect of salinity on os-motic adjustment, glycinebetaine accumulation and the betaine aldehyde dehydrogenase gene expression in two halophytic plants, *Salicornia europaea* and *Suaeda maritima* [J]. *Plant Sci-ence*, 2004, 166(5): 1345–1349.
- [7] 岳利军, 袁坤, 李海伟, 等. 荒漠植物沙芥苗期对不同浓度 NaCl 的适应机制[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 144–152.
- [8] Liang W, Ma X, Wan P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review. [J]. *Biochemical and Biophysical Research Commu-nications*, 2018, 495(1): 286–291.
- [9] 杨秀艳, 张华新, 张丽, 等. NaCl 胁迫对唐古特白刺幼苗生-长及离子吸收、运输与分配的影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(9): 165–171.
- [10] 韩积斌, 许建新, 王国强, 等. 柴达木盆地尕斯库勒盐湖区成盐物质的来源与水力迁移作用[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(6): 1551–1560.
- [11] 南京水利科学研究院. SL237–1999 土工试验规程[S]. 北-京: 中国水利水电出版社, 1999: 181–491.
- [12] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 23–192.
- [13] 闫永庆, 袁晓婷, 刘威, 等. 盐胁迫及外源 Ca^{2+} 对白刺离子-吸收、运输的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(3): 71–78.
- [14] Xu C Z, Tang X L, Shao H B, et al. Salinity tolerance mecha-nism of economic halophytes from physiological to molecular hi-erarchy for improving food quality [J]. *Current Genomics*, 2016, 17(3): 207–214.
- [15] 张继伟, 赵昕, 陈国雄, 等. 盐胁迫下荒漠植物柠条和油蒿的离子吸收及分配特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(3): 68–73.
- [16] Hasanuzzaman M, Nahar K, Alam M M, et al. Potential use of halophytes to remediate saline soils [J]. *Biomed Research In-ternational*, 2014, 2014: 1–12.
- [17] 夏尚光. NaCl 胁迫对 4 个树种体内离子分布的影响[J]. *安-徽农业科学*, 2015, 43(24): 179–183.
- [18] Djanaguiraman M, Prasad P V V. Effects of salinity on ion transport, water relations and oxidative damage [M]//Ahmad P, Azooz M M, Prasad M N V. *Ecophysiology and responses of plant under salt stress*. New York: Springer, 2013: 89–114.
- [19] 夏阳. 天山博格达峰西北麓盐生植物群落及其化学元素特-征[J]. *干旱区研究*, 1994, 11(1): 42–49.
- [20] 杜利霞, 朱慧森, 董宽虎, 等. 盐胁迫对赖草离子吸收和运-输的影响[J]. *草地学报*, 2015, 23(3): 510–516.
- [21] Kobayashi S, Abe N, Yoshida K T, et al. Molecular cloning and characterization of plasma membrane-and vacuolar-type $\text{Na}^{+}/\text{H}^{+}$ antiporters of an alkaline-salt-tolerant monocot, *Puccinellia tenuiflora* [J]. *Journal of Plant Research*, 2012, 125(4): 587–94.
- [22] 赵可夫, 李法曾, 张福锁. 中国盐生植物[M]. 第 2 版. 北-京: 科学出版社, 2013: 99–452.
- [23] 范亚文. 种植耐盐植物改良盐碱土的研究[D]. 哈尔滨: 东-北林业大学, 2001.
- [24] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学-报*, 2008, 45(5): 837–845.
- [25] 王雪梅, 柴仲平, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 干旱区土壤盐-渍化及其影响因子分析—以渭干河—库车河三角洲绿洲-为例[J]. *土壤*, 2009, 41(3): 477–482.
- [26] Foster K J, Miklavcic S J. Toward a biophysical understanding of the salt stress response of individual plant cells [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2015, 385: 130–142.
- [27] 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等. NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和-阳离子吸收、运输与分配特性[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 326–336.
- [28] 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.
- [29] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 6(5): 441–445.
- [30] Walker D J, Leigh R A, Miller A J. Potassium homeostasis in vacuolate plant cells [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1996, 93(19): 10510–10514.
- [31] Pottosin I, Velarde-Buendía A M, Dobrovinskaya O. Potassium and sodium transport channels under NaCl stress [M]//Ahmad P, Wani M R. *Physiological mechanisms and adaptation strate-gies in plants under changing environment*. New York: Spring-er, 2014: 325–359.
- [32] 李品芳, 白文波, 杨志成. NaCl 胁迫对苇状羊茅离子吸收与-运输及其生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(7): 1458–1465.
- [33] 刘金林, 王小德. 2 种楠木树种幼苗耐盐性综合评价[J]. *江-苏农业科学*, 2018, 46(7): 148–152.
- [34] 郝金标, 宋玉民, 邢尚军, 等. 黄河三角洲生物多样性现状-与可持续利用[J]. *东北林业大学学报*, 2002, 30(6): 120–123.
- [35] 高航, 李天才, 索有瑞. 柴达木地区唐古特白刺和西伯利-亚白刺中矿物质元素的分析[J]. *广东微量元素科学*, 2002, 9(8): 52–54.

The Assessment of Salt-absorption and Salt Tolerance of Halophytes in the Gaskule Salt Lake Area of Qaidam Basin

YU Dong-mei^{1,2}, QI Zhao-xin^{1,2,3}, HU Xia-song^{1,2,4}, LIU Ya-bin^{1,2,3},
YANG You-qing^{1,2,3}, LI Shu-xia^{1,2,3}, WANG Jian-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,
Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, 810016, China)

Abstract: In this study, Gaskule salt area in the Qaidam Basin has been selected as the test site, where 9 predominant halophytes have been taken as the tested species; and physical indices such as soil particle size distribution, soil weight, moisture content, etc., as well as soluble ion contents such as HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} have been determined to explore the ion distribution characteristic in different parts of these species. Based on pre-mentioned results, ion absorption differential among these species have been investigated. Moreover, the ratios of K^+/Na^+ in leaves of plants have been introduced to assess the capacity of salt-tolerance among these plants; the results show that the ranking order of K^+/Na^+ ratios in these species from high to low is *Oxytropis glabra* DC. 0.84, *Asparagus filicinus* Ham. 0.58, *Nitraria tangutorum* Bobr. 0.55, *Salsurea salsa* (Pall.) Spreng. 0.52, *Triglochin maritimum* Linn. 0.50, *Carex enervis* C. A. Mey. 0.47, *Koeleria cristata* (L.) Pers. 0.41, *Phragmites australis* Trin. 0.39 and *Leymus secalinus* Tzvel. 0.34. The results have a theoretical meaning in treating soil salinization in Gaskule salt lake and other adjacent areas using halophytes

Key words: Qaidam Basin; Gaskule salt lake area; Halophytes; Salt absorption; K^+/Na^+ ; Salt-tolerance assessment