

五种沙生植物根际土壤的盐分状况

李从娟^{1,2}, 马 健^{1,*}, 李 彦¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:以根袋模拟法,研究了古尔班通古特沙漠 5 种常见沙生植物梭梭(*Haloxylon ammodendron* Bge)、白梭梭(*Haloxylon persicum* Bge)、刺沙蓬(*Salsola Rathenica* Iljin)、骆驼蓬(*Peganum harmala* Linn)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap)根际土壤的 pH 值和盐分状况,结果表明:5 种植物根际土壤的 pH 值均小于非根际土壤,其中梭梭根际土壤和非根际土壤差值最大,达 0.3 个单位;5 种供试植物根际土壤的电导率均高于非根际土壤,除刺沙蓬外其它供试植物均差异显著($p < 0.05$);可溶性总盐含量在根际土壤中均出现了聚集的现象,主要是 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在根际的聚集, Cl^- 主要在骆驼刺根际中出现了聚集现象,在其他植物根际和非根际中没有显著变化;5 种供试植物中骆驼刺根际土壤盐分聚集最为明显;从 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 、 Na^+/K^+ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 的值可以看出,沙生植物根际土壤主要是硫酸钙、镁盐的聚集,而非氯化钠的聚集。以上结果说明,沙生植物能够通过根际调节降低根际土壤的 pH 值,从而促进植物对土壤中养分以及水分的利用,同时沙生植物根际土壤中盐分聚集的现象为植物根际的“盐岛”效应的发生提供了很好的依据。

关键词:根际;沙生植物;pH 值;盐分

文章编号:1000-0933(2009)09-4649-07 中图分类号:Q142,Q948,S154 文献标识码:A

Salt content in the rhizosphere of five psammophytes

LI Cong-Juan^{1,2}, MA Jian^{1,*}, LI Yan¹

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4649 ~ 4655.

Abstract: A rhizobag experiment was conducted on five psammophytes to investigate the pH values, salt content of rhizospheric soil and bulk soil, and to compare the differences between them. The results showed that for all five tested plants, their rhizospheric pH values were lower than those in bulk soil. Electrical conductivity in rhizospheric soil was higher than that in bulk soil, and the differences for Electrical conductivity all reached a significant level ($p < 0.05$) except *Salsola Rathenica* Iljin. Concentrations of major ions such as SO_4^{2-} , Ca^{2+} and Mg^{2+} were enriched in rhizosphere soil. The $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, Na^+/K^+ , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ ratio indicated that the accumulation of SO_4^{2-} in rhizosphere was more significant than that of Cl^- . and Ca^{2+} , K^+ and Mg^{2+} were enriched more significantly than Na^+ . This study showed that CaSO_4 , MgSO_4 , K_2SO_4 were enriched in rhizospheric soil of desert plants, but the NaCl enrichment was not observed. Lower pH values in the rhizospheric soil improved the micro-environment of the root system for desert plant and thus facilities efficient use of various nutrients and water by the desert. The salt accumulation in the rhizosphere may be one of the mechanisms for the formation of salt island under a desert shrub canopy.

Key Words: rhizospheric soil; psammophytes; pH value; soil salt

受根系活动的影响,根际微区土壤性状与非根际土壤性状有着很大的差别^[1,2],它是水分和矿质养分进

基金项目:中国科学院“西部之光”资助项目

收稿日期:2008-09-13; 修订日期:2008-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: majian@ms.xjb.ac.cn

入根系、参与生物循环的门户,同时也是根系自身活动和代谢对土壤影响最直接、最强烈的区域^[3]。由于受根系分泌物、微生物活动及土壤水分差异的影响,根际土在物理、化学和生物学特性上明显不同于原土体,因此根际化学和根际过程的研究受到国内外许多植物学家及土壤学家的关注^[4~8]。在盐渍化土壤中,根际是植物发生盐害最直接的外部环境,研究根际土壤有关性状可以更准确地说明植物在盐渍环境中受害程度及其抗盐能力状况,根际的“盐岛”效应也被许多科学家所证实,而对于沙生植物根际的盐分过程以及沙生植物对盐渍环境的适应机制方面的研究却少有报道。

古尔班通古特沙漠(北纬 44°15′~46°50′,东经 84°50′~91°20′)是中国第二大沙漠,也是中国面积最大的固定、半固定沙漠,为典型的大陆性干旱气候,该区夏季炎热干燥,冬季寒冷,年均气温 6.6℃,年降水量仅 70~150mm,远低于 1900mm 的年潜在蒸发量,土壤盐渍化较为严重^[9],然而这里却孕育着丰富的植物,其中梭梭、白梭梭、刺沙蓬、骆驼蓬、骆驼刺等最为常见,可见他们对干旱、盐渍化的沙漠土壤有很强的适应性,其中根际微环境的改变、根系分泌物的产生以及根际微生物的活动是沙生植物适应极端环境的有效方式之一。本文利用根袋法研究了古尔班通古特沙漠 5 种常见沙生植物根际和非根际的 pH 值、电导率及盐分含量的变化状况等,旨在探明不同种沙生植物根际盐分变化的特殊性与差异性,以期能从根际盐分角度揭示沙生植物对干旱、盐碱化的土壤环境的适应机理。同时对于揭示沙漠地区植物营养特征和植物群落演替也有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究中供试土壤于 2006 年 9 月中旬采集于距中国科学院新疆生态与地理研究所阜康荒漠生态试验站北约 15km 的古尔班通古特沙漠南缘,根据中国土壤系统分类,古尔班通古特沙漠的土壤属于新成土土纲,旧称风沙土;其水分为干旱土壤水分状况,因而,沙漠区域的土壤类型为干旱砂质新成土,其基本理化性质于 2006 年 10 月初(表 1)用常规分析法^[10]进行测定。取风干土按土水比 1:5 制备待测液,用于 pH 值、电导率及盐分的测定,pH 值用电位法测定;电导率用手持式电导仪测定;有机质用重铬酸钾外热法;全氮用开氏法;全磷用 HCl-HF 消化钼锑抗比色法;全钾用原子吸收分光光度计法。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic Physical and Chem character of tested soil

土壤类型 Agrotype	母质 Material	pH 值 pH value	电导率 Electrical conductivity (ms/cm)	可溶性总盐 Total salt (g/kg)	有机碳含量 Organic carbon (g/kg)	全氮含量 Total N (g/kg)	全磷含量 Total P (g/kg)	全钾含量 Total K (g/kg)
新成土 Entisols	风积沙 Eolian-sand	9.5	0.080	5.615	3.404	0.065	0.288	17.956

供试植物种选用该区最常见的 5 种沙生植物:梭梭、白梭梭、刺沙蓬、骆驼蓬和骆驼刺,他们都是该区常见的且生长良好的沙生植物,并且他们对干旱、盐碱化的沙漠土壤环境有很强的适应性,其基本特征见表 2。

表 2 供试植物种特征

Table 2 Character of the tested plants

植物种 Species *	所属科 Family	生活型 Life Form	生境 Habitation
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> Bge	藜科 Chenopodiaceae	多年生小乔木 Perennial small trees	沙漠丘间地 Desert interdune
白梭梭 <i>Haloxylon persicum</i> Bge	藜科 Chenopodiaceae	多年生小乔木 Perennial small trees	沙漠沙丘 Desert dunes
刺沙蓬 <i>Salsola Rathenica</i> Iljin	藜科 Chenopodiaceae	1 年生草本 Annual herb	沙漠沙丘 Desert dunes
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i> Linn	莨菪科 Zygophyllaceae	1 年生草本 Annual herb	沙漠边缘 Desert edge
骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i> Shap	豆科 Leguminosae	多年生半灌木 Perennial semi-shrub	沙漠边缘 Desert edge

* 下同 the same below

1.2 植物的根袋培养及样品采集

本研究在中国科学院新疆生态与地理研究所阜康荒漠生态站室外遮荫篷下进行(遮荫篷透光率为

75%), 降雨时, 用塑料纸临时搭建雨蓬, 以防止降雨对试验结果产生影响。实验开始于 2007 年 4 月, 采用根袋模拟装置^[11~13] 进行培养, 将采集的沙土过 0.5mm 筛, 根袋用 300 目的尼龙沙网缝制而成, 直径 3cm, 高 12cm, 每个根袋内装满过筛好的沙土, 同时将相同的沙土装入直径 28cm, 高 36cm 的盆中, 把装满沙土的根袋埋入盆中央, 然后加蒸馏水至土壤含水量 $140\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 备用。每个根袋中播入饱满的植物种 15 粒, 等发芽后定苗 10 株, 生长期每 2 星期浇 1 次水, 每盆每次浇 1L 蒸馏水。植物生长 4 个月后(此时所有植物的根系完全充满根袋, 因为根袋体积相对于 10 株植株根系的扩展范围小), 取根袋中 1cm 以下(因根系向下生长上部根系未能完全充满根袋)的土壤作为根际土, 取距根袋外 2~3cm 的土壤作为非根际土。

1.3 样品分析

将采集的土样在自然状态下风干后, 过 0.2 mm 筛, 取风干土按土水比 1:5 制备待测液, 用于 pH 值、电导率及盐分的测定, pH 值用电位法测定; 电导率用手持式电导仪测定; Na^+ 和 K^+ 用火焰光度计法; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的测定用 EDTA 络合滴定法; Cl^- 的测定用 AgNO_3 滴定法; SO_4^{2-} 的测定用 EDTA 间接滴定法; 以上各项指标测定的具体方法见参考文献 10^[10]。

1.4 数据分析处理

数据分析使用 DPS 和 Origin7.5 软件, 同时利用统计报表, 单因子方差分析 Tukey 检验进行统计分析, 结合 Origin7.5 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤 pH 值的比较

不同种植物, 表现出不同的根际效应, 而 pH 值的变化是根际微生态系统中一个最为活跃的因素, 在很多方面影响着土壤中各种元素的存在形态、有效性及迁移转化^[2,14]。由图 1 可以看出, 5 种植物根际土壤的 pH 值均小于非根际土壤, 其差值因植物种的不同而不同, 其中梭梭根际土壤的 pH 下降最大, 达 0.3 个单位, 且在 0.05 水平达到显著差异。白梭梭、刺沙蓬、骆驼蓬和骆驼刺的根际 pH 分别下降 0.12、0.16、0.13、0.12 个单位, 同时梭梭、白梭梭两种小乔木的根际土壤和非根际土壤的 pH 值都明显低于其他 3 种供试植物。

可见沙生植物根系可以有效地降低根际土壤的 pH 值, 主要原因是根系通过呼吸释放 CO_2 、根系分泌有机酸、根际微生物活动产生有机酸和 CO_2 等^[2]。梭梭、白梭梭两种小乔木的根际土壤和非根际土壤的 pH 值低于其他 3 种供试植物因为其根系较草本植物比较发达, 根系呼吸释放 CO_2 、分泌有机酸能力相对较强, 使其根际土壤的 pH 值下降较多。

3.2 不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤电导率的比较

从图 2 可以看出, 五种供试植物根际土壤的电导率均高于非根际土壤, 其中梭梭根际土壤的电导率比非根际土壤高 16.68%, 白梭梭根际土壤电导率比非根际土壤高 8.6%, 刺沙蓬根际土壤比非根际土壤高 1.97%, 骆驼蓬根际土壤比非根际土壤高 24.23%, 骆驼刺根际土壤比非根际高土壤 32.94%, 除刺沙蓬外都差异显著 ($p < 0.05$, Tukey 检验)。

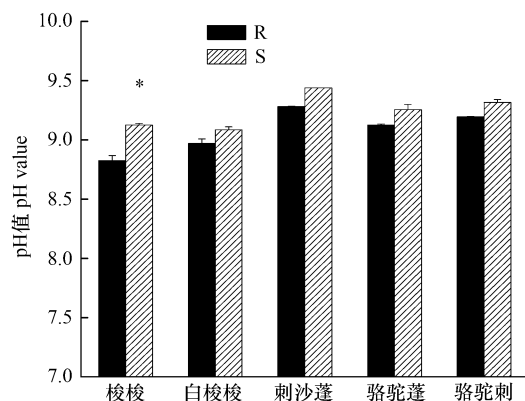


图 1 不同种沙生植物根际土壤和非根际土壤 pH 值的变化状况
Fig. 1 pH value of rhizospheric soil and bulk soil from different psammophytes

R: 根际土 Rhizospheric soil; S: 非根际土 Bulk soil, 下同; * 表示各种指标在根际与非根际间有显著性差异 (Tukey 法) $p < 0.05$, 下同 The * indicate significant differences between rhizospheric soil and bulk soil at $p < 0.05$ level Tukey, the same below

3.3 不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤盐分含量的比较

3.3.1 可溶性总盐含量

不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤可溶性总盐含量的变化状况见图 3, 5 种植物可溶性总盐在根际土壤中均出现了聚集现象, 这与其显著正相关的电导率在根际也较高相一致, 而与 pH 值在根际土壤和非根际土壤的变化状况截然相反; 其中梭梭总盐含量在根际土壤的聚集为 119.15%, 白梭梭为 110.16%, 刺沙蓬为 108.%, 骆驼蓬为 127.84%, 骆驼刺为 129.51%, 且骆驼刺根际土壤和非根际土壤中总盐含量都最高, 这与电导率的变化状况也一致; 统计分析表明, 可溶性总盐含量在五种供试植物的根际土壤和非根际土壤之间均差异显著 ($p < 0.05$, Tukey 检验), 这说明了沙生植物根际土壤有显著的盐分聚集现象。主要因为植物根系对土壤中盐分的迁移是由蒸腾作用以及植物根系对盐分的吸收作用使大量盐分随土壤水分运动到根际周围^[15], 使植物根际土壤中的盐分含量明显高于非根际土壤。

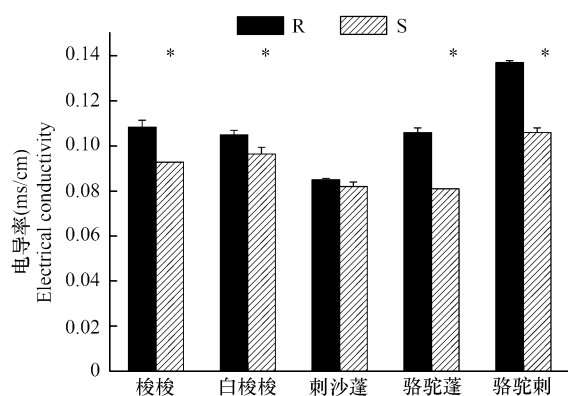


图2 不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤电导率的变化状况

Fig. 2 Electrical conductivity of rhizospheric soil and bulk soil from different psammophytes

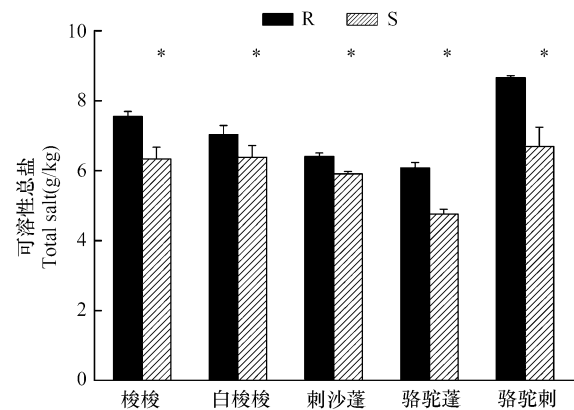


图3 不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤可溶性总盐含量的变化状况

Fig. 3 Total salt of rhizospheric soil bulk soil from different psammophytes

3.3.2 主要可溶性盐离子

从图 4 中可以看到, 根际土壤中主要可溶性盐离子 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 都出现了聚集的现象; Cl^- 的含量在根际和非根际中的变化不大, 除刺沙蓬根际和非根际有显著差异外其他供试植物并无差异 ($p < 0.05$, Tukey 检验); 而 SO_4^{2-} 在所有供试植物根际土壤中的聚集差异显著, 且梭梭和白梭梭根际土壤和非根际土壤中 SO_4^{2-} 的含量都较其他 3 种植物高, Ca^{2+} 在根际中也出现了明显的聚集现象, 除了白梭梭以外其余四种供试植物根际土壤和非根际土壤的含量都差异显著; Mg^{2+} 在根际土壤中的含量也大于非根际土壤, 除梭梭和骆驼蓬均达到显著差异; K^+ 虽然在除了刺沙蓬以外的其余 4 种植物的根际土壤中聚集, 但差异并不明显 ($p < 0.05$, Tukey 检验); 而 Na^+ 除骆驼蓬和骆驼刺外其根际土壤中含量均小于非根际土壤; 这说明了沙生植物根际土壤中盐分的聚集主要是 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 而 Na^+ 发生了亏缺。

从图中还可以看出, 与非根际土壤相比, 在骆驼刺根际土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的聚集以及 Na^+ 的亏缺都达到显著差异, 这种现象都表明骆驼刺根际较其他植物种有更强的盐分聚集作用, 说明骆驼刺较其他供试植物种有更强的耐盐能力, 这方面可能与骆驼刺自身的生理特性有很重要的关系, 骆驼刺豆科植物-根瘤菌共生体系具有较强的固氮能力, 因此体内所含大量元素水平较高; 其二因为, 豆科植物体内氮的供应比较充足, 而氮素对叶片的光合作用非常重要, 叶片含氮量增加 CO_2 同化速率增加, 因此加快了植物对各种离子的吸收能力^[16]。

3.3.3 盐分组成

根际土壤中离子的变化被认为是根系对离子的选择吸收和吸收速率不同造成的^[17]。溶液中的盐分通过

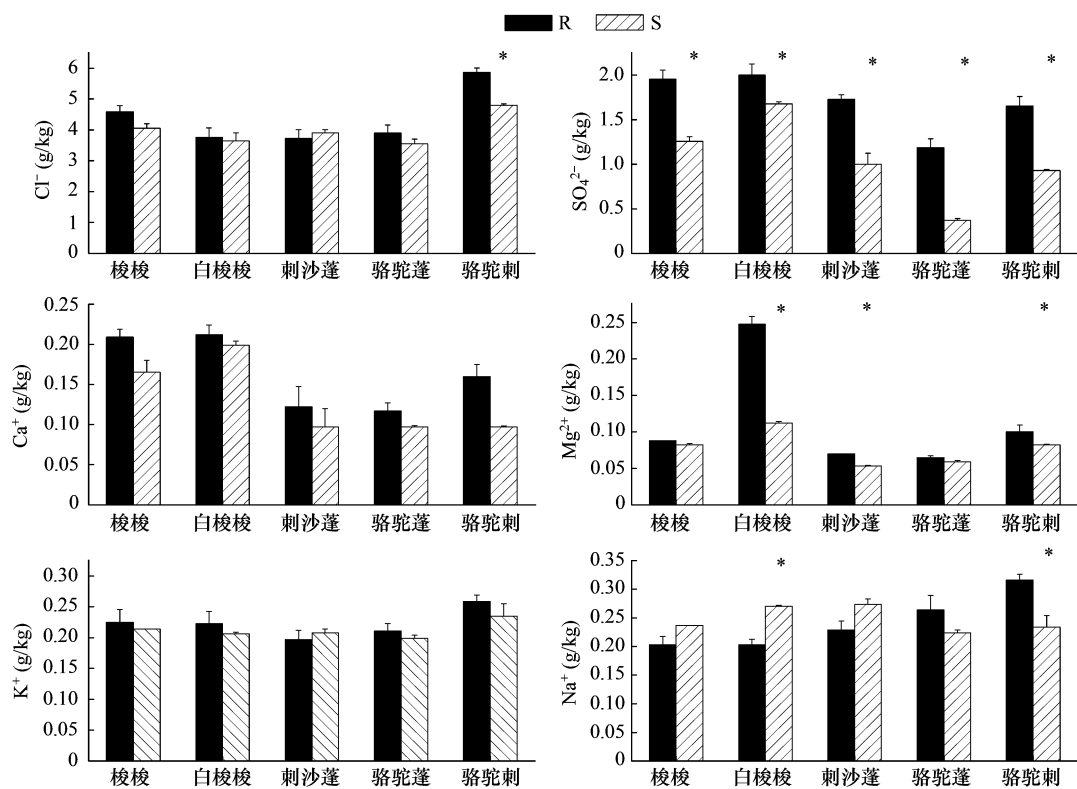


图4 不同种沙生植物根际土壤与非根际土壤主要盐离子的变化状况

Fig. 4 Major salt ions of rhizospheric soil and bulk soil from different psammophytes

质流到达根表,当离子迁移至根表的速率慢于根系吸收的速率时表现为离子亏缺,而当离子向根表迁移的速率快于根系的吸收速率时则表现为离子富集。

从表3中 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 、 Na^+/K^+ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 的值可以看出,非根际土壤中的比值基本都大于根际土壤中的比值,且5种供试植物根际土壤与非根际土壤之间都差异显著($p < 0.05$, Tukey 检验),说明根际土壤中 SO_4^{2-} 聚集率大于 Cl^- , Ca^{2+} 在根际土壤中的聚集率大于 Na^+ , Mg^{2+} 除骆驼刺和骆驼蓬外在根际土壤中的聚集率大于 Na^+ ,这是因为植物在吸收养分及离子时, Na^+ 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处于竞争状态,根际土壤中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的聚集,有助于减少对 Na^+ 的吸收^[20];而与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的绝对聚集量相比, Na^+ 的绝对亏缺量仅占很小部分,说明阳离子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在根际土壤中聚集程度仍然较高。

表3 不同种沙漠沙生植物根际土与非根际土盐分组成的变化状况

Table 3 Salt component of rhizospheric soil and bulk soil from different psammophytes

区域 Region		梭梭 Haloxylon ammodendron Bge.	白梭梭 Haloxylon persicum、Bge	刺沙蓬 SalsolaRathenica Iljin	骆驼蓬 Peganum harmala Linn.	骆驼刺 Alhagi Sparsifolia Shap.
$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	R	2.3463a	1.8801a	2.1567a	3.289a	3.5433a
	S	3.2283b	2.1753b	3.901b	9.5431b	5.1482b
Na^+/K^+	R	0.9022a	0.9103a	1.1624a	1.2511a	1.2201a
	S	1.1074b	1.3067b	1.317b	1.1256b	0.9957b
$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	R	0.9713a	0.9575a	1.877a	2.2564a	1.975a
	S	1.4364b	1.3567b	2.8247b	2.3093a	2.4124b
$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$	R	2.3068a	0.8185a	3.2714a	4.0615a	3.16a
	S	2.8902b	2.4107b	5.1698b	3.7966b	2.8536b

R:根际土 Rhizospheric soil; S :非根际土 Bulk soil; 表中同列中不同的小写字母表示各种指标在根际与非根际之间差异显著性的检验结果 (Tukey 法 $p < 0.05$) The lowercases in the table indicate significant differences between rhizospheric soil and bulk soil at $p < 0.05$ level (Tukey)

4 讨论

与以往的研究结果一致^[4,6],沙生植物能够降低根际环境的 pH 值,从而改善了根际土壤的微环境,其中梭梭和白梭梭在 5 种供试植物中根际土壤的 pH 值降低较为明显,说明它们较其他 3 种植物更易于改善根际环境;根际土壤 pH 值的下降一方面能提高多种矿质养分的有效性,促进植物对 Fe、Mn、Zn、B 等微量元素的吸收,进而可以促进植物生长和提高植物体病虫害的能力^[18];另一方面,根际土壤 pH 值下降,能促进某些养分有效性转化和活化,对改良沙漠土壤和培肥地力有重要意义^[19,20]。

以往的研究表明,盐分在植物根际土壤中有明显的聚集,包括盐生植物和非盐生植物, Riley 等以非盐生植物大豆为材料进行的研究表明,大豆根际土全盐、电导率均高于非根际土^[7];弋良朋等对荒漠盐生植物根际盐分状况的研究显示,根际土壤盐分的聚集程度与植物的耐盐能力呈正相关,且囊果碱蓬和盐爪爪在根际土壤中表现为较高的盐分聚集现象^[21];田野等对盐胁迫下杨树根际系统盐分离子分布特性的研究显示杨树根际土壤的电导率高于非根际土,水溶性 K^+ 在根际亏缺, Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在根际富集。本研究结果显示:沙生植物根际土壤中的盐分含量也有明显的聚集现象;其中骆驼刺根际盐分的聚集现象较其他供试植物种更为明显;在所有供试植物中,阴离子在根际土壤中的聚集率 SO_4^{2-} 大于 Cl^- 、而阳离子在根际土壤中聚集的主要是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,而并非 Na^+ ,这不同于以往荒漠盐生植物^[26]根际土壤对 Cl^- 和 Na^+ 的聚集。

总之,沙生植物对于干旱、贫瘠、盐碱化的沙漠环境有一定的适应机制,并且不同植物在盐分的吸收和运输上呈现出不同的作用机理,这与植物自身的生理特征、生活型、生境以及环境对植物的胁迫都有很重要的关系。

在逆境条件下植物能够感应外界胁迫,并能通过自身的调节,使之在生理和形态上发生适应性反应,以增强在胁迫条件下的生存机会^[21]。而根际是植物与土壤环境接触的重要界面,对土壤环境更为敏感,更易对所处的土壤环境做出反应。从植物-根际-土体这一系统来看,沙生植物能够通过降低根际 pH 值,改变根际周围的强碱环境,进而促进植物体对养分和水分的吸收;同时沙生植物根际盐分的聚集为以往的植物根际的“盐岛”效应提供了又一事实证据。沙生植物通过根际调节使根际环境发生改变,这是沙生植物适应干旱,强盐碱沙漠土壤环境的有效方式之一。根际中盐分含量的变化对于沙生植物的耐盐碱、耐旱、耐贫瘠机制至关重要,这还需结合根际微生物、根系分泌物和根际内水分的梯度等进一步研究。

References:

- [1] Toal M E, Yeomans C V, Killham K S, *et al.* A review of rhizosphere carbon flow modeling. *Plant Soil*, 2000, 222: 263—281.
- [2] Zhang F S, Cao Y P. Rhizosphere dynamics and plant nutrition. *Acta Pedologic Sinica*, 1992, 29 (3): 239—250.
- [3] Ye G F, Hou J, Zhang L H, *et al.* Rhizosphere Soil Nutrient and Enzyme Activity in Different Stand Age of *Casurina equisetifolia* Protection Forest, 2006, 20(4): 86—89.
- [4] Wang Y, Meng Y L, Chen B L, *et al.* Studies on the soil microorganism quality and soil nutrient content at the rhizosphere and non-rhizosphere region of cotton in wheat-cotton intercropping system. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3486—3490.
- [5] Darrah P R. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant and Soil*, 1993, 156: 1—20.
- [6] Ding Y X. Properties of rhizosphere of Poplar on marine soil. *Journal of Nanjing Forest University*? 1996, 20(2): 15—19.
- [7] Riley D, Barber S A. Salt accumulation at the soybean (*Glycine L. Merr*) root-soil interface. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, 34: 154—155.
- [8] Yang Y S, He Z M, Zou S Q. *et al.* A Study on the soil micorobes and biochemiety of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis Kauakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 198—203.
- [9] Zhang B Q. Soil Salinization and its prevention in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 1993, 10(1): 66—71.
- [10] Bao S D. *Soil Chemical Analysis of Agriculture (Fourth Edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] McGrath S P, Shen Z G, Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils. *Plant and Soil*, 1997, 188: 153—159.
- [12] Su B L, Han Sh J, Wang J G. Advance in soil sampling methods in rhizosphere microzone study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (3): 477—480.

- [13] Gregory P J, Hinsinger P. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: an overview. *Plant Soil*, 1999, 21:1—9.
- [14] Jiang D A, Chen J M. Change of Ph and available pool of B, Cu, Zn, Mn in surface rice soils in Yixing, Jiangsu Province over the last decade. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1997, 20(4):111—113.
- [15] Liu G M, Yang J S, Li D S. Evaporation regularity and its relationship with soil salt. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 19(3):384—389.
- [16] Jiang C Z, Rodermet S R, Shibles R M. Regulation of photosynthesis in developing leaves of soybean chlorophyll-deficient mutants. *Photosynth Research*, 1997, 51:185—192.
- [17] Wu L H, Zhang S J. Rhizosphere effect of nutrients in different maize soil with different fertility levels. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):545—548.
- [18] Zhang F S. Soil and plant nutrition research progress. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992. 40—57.
- [19] Zhang Y D, Bai S B, Wang Z Q, *et al.* Soil P availability in larch rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1):31—34.
- [20] Li J H. Ion transport in soil-crop rhizosphere system under different conditions. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2):186—194.
- [21] Yi L P, Ma J, Li Y. Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3565—3571.

参考文献:

- [2] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养. *土壤学报*, 1992, 29(3):239—250.
- [3] 叶功富, 侯杰, 张立华, 等. 不同年龄木麻黄林地根际土壤养分含量和酶活性动态. *水土保持学报* 2006, 20(4):86—89.
- [4] 王瑛, 孟亚利, 陈兵林. 麦棉套作棉花根际非根际土壤微生物和土壤养分. *生态学报*, 2006, 26(10):3486—3490.
- [6] 丁应样. 滨海土壤几个树种根际土性状的研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1996, 20(2):15—19.
- [8] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性的研究. *生态学报* 1998, 18(2):198—203.
- [9] 张丙乾. 新疆土壤盐碱化及其防治. *干旱区研究*, 1993, 10(1):66—71.
- [10] 鲍士旦主编. 农业土壤化学分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 蒋定安, 成杰民. 近十几年来宜兴市水稻土表层土壤 pH 及 B、Cu、Zn、Mn 有效态含量的变化. *南京农业大学学报*, 1997, 20(4):111—113.
- [15] 刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 地下水蒸发规律及其与土壤盐分的关系. *土壤学报*, 2002, 9(3):384—389.
- [17] 吴龙华, 张素君. 不同土壤类型和肥力玉米地土壤养分根际效应研究. *应用生态学报*, 2000, 11(4):545—548.
- [18] 张福锁主编. 土壤与植物营养研究动态. 北京: 北京农业大学出版社, 1992. 10—12.
- [19] 张彦东, 白尚斌, 王政权. 落叶松根际土壤磷的有效性研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1):31—34.
- [20] 土壤-作物根际系统中离子的迁移. *土壤学报*, 1998, 35(2):186—194.
- [21] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征. *生态学报*, 2007, 27(9):3565—3571.