

荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征

弋良朋^{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 :中国西北地区是我国干旱、盐碱化土壤分布面积较广、土壤积盐较重的地区,这里发育着丰富的盐生植物。目前对于干旱荒漠区盐生植物根际特征的研究相对较少,而不同盐生植物的根际特征对于研究盐生植物适应盐渍环境的机制有着重要意义。本研究采用盆栽根袋法对 7 种不同类型的荒漠盐生植物的根际盐分和养分特征进行了初步探索。结果表明:盐分在盐生植物根际发生富集,稀盐盐生植物和泌盐盐生植物根际土壤中总盐和 8 种主要盐分离子的含量都有所增加,而在拒盐盐生植物根际中增加不显著,其中 Cl^- 和 Na^+ 的富集程度相对其它 6 种离子的富集程度要高。稀盐盐生植物和泌盐盐生植物根际土中的 $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ 比土体有显著的降低,表明在稀盐盐生植物和泌盐盐生植物根际土壤中 Cl^- 的富集程度比 SO_4^{2-} 高,拒盐盐生植物根际土盐分 $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ 比略有提高。7 种盐生植物根际土中的 Na^+ / K^+ 、 $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+ / \text{Mg}^{2+}$ 均比较土体有显著的增加,芦苇根际土中的增加最小。在所有研究植物中,根际土壤中全 N 含量比土体的含量高,但全 P 和全 K 含量却比土体的含量低,根际土壤中有效态养分的变化则与全态相反,根际土壤中的有效 N 含量比土体中的都显著降低,除芦苇外,其他六种盐生植物根际土壤中有效 P 和有效 K 的含量都高于土体,但有效 P 的富集不及有效 K 富集的程度高。在研究的七种植物中,钠猪毛菜根际土壤的有效 N 亏缺量最高,有效 P 和速效 K 富集也最少。7 种植物,尤其是稀盐盐生植物和泌盐盐生植物的地上部分的主要盐离子含量比地下部分高,如 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ ,在根际富集程度最高的 Cl^- 和 Na^+ ,在植株的地上部分也增加的最多。

关键词 :根际,盐生植物,荒漠,盐分,养分

文章编号 :1000-0933 (2007) 09-3565-07 中图分类号 :Q142, Q945, Q948 文献标识码 :A

Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes

YI Liang-Peng^{1,2}, MA Jian¹, LI Yan^{1,*}

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

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

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (9) : 3565 ~ 3571.

Abstract : North-West China is an arid region where the saline soil is widely distributed, and therefore is rich in halophyte plants. Very little is known on the rhizospheric soil of the halophytes in this arid desert region, as few research works had been done. We conducted a rhizobag experiment on desert solonchak soil to investigate the salt and nutrient content of the rhizospheric soil of the desert halophytes, and to compare them with the bulk soil. The results revealed that soil salts were accumulated in the rhizosphere of desert halophytes, with total salt and the concentrations of major ions increased for both succulent halophytes and salt secrete halophytes, but this increase was insignificant for salt-resisting halophytes. Accumulation of Cl^- and Na^+ is the most significant among the 8 major ions. The $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ ratio of rhizosphere decreased remarkably in succulent halophytes and salt secrete halophyte, as comparing to bulk soil, and this indicated that

基金项目 :国家自然科学基金资助项目 (40471048)

收稿日期 :2006-12-04 ; 修订日期 :2007-07-18

作者简介 :弋良朋 (1974 ~) 男,新疆石河子人,博士生,主要从事植物生态学研究. E-mail : yiliangp@ mails. gucas. ac. cn

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

Foundation item : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471048)

Received date 2006-12-04 ; **Accepted date** 2007-07-18

Biography : YI Liang-Peng, Ph. D., candidate, mainly engaged in plant ecology. E-mail yiliangp@ mails. gucas. ac. cn

accumulation of Cl^- was more significant than SO_4^{2-} . The Na^+/K^+ , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ ratio in the rhizosphere were higher than bulk soil to all seven halophytes. Total N increased significantly in the rhizosphere, but total P and total K decreased. However, the available N, P and K in the rhizosphere behaved in an opposite way: with available N decreased but available P and available K increased in the rhizosphere except for *Phragmites communis* Trin. Deficit of available N is the most significant, and accumulation of available P and available K were the least for *Salsola nitraria* Pall. among all seven halophytes. The ionic contents of the above ground part of the plants were higher than the underground part in all seven halophytes, especially for Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} and K^+ . Accumulation of Cl^- and Na^+ in the aboveground part of the plant were the most significant among 8 major ions, which coincided with the ionic accumulation in the rhizosphere, especially for succulent halophytes and salt secrete halophyte.

Key Words: rhizosphere, halophyte, desert, salt, nutrient

根际是土壤中化学和生物学性质最活跃的微域,它的重要性已得到广泛的认识^[1]。由于根的分泌物、根的吸收、微生物的活动以及水分关系的差异,根际土壤的化学和物理性质与土体(非根际土)相比有很大的差异^[2-5],因此根际化学和根际过程的研究对于认识植物对土壤中养分和盐分的利用及适应非常重要。在过去的10a,尤其是在许多农作物和模式植物上^[6,7],对于由根诱导而产生的根际土壤中各种化学、物理和生物学性质的变化和根际过程的研究已经取得了许多进展和结果。但是对于盐生植物根际土壤特征的研究尚不多见。

1995年,Breckle以较多生理生态学研究成果,包括盐的吸收、转运及在盐生植物体内的最终积累作为准则将盐生植物分成3个类型:泌盐盐生植物、稀盐盐生植物(肉质化盐生植物)和拒盐盐生植物(假盐生植物)^[8]。这3种类型的盐生植物在干旱区盐生荒漠上都有广泛的分布,新疆是我国最干旱、盐碱化土壤分布面积最广、土壤积盐最重的地区^[10],在特定的自然环境条件下发育有丰富的盐生植物,是中国盐生植物种类最多、分布最广的区域^[11]。目前,国内外对盐生植物所做的大量研究,多是集中在盐对植物地上部分的形态、生理特征以及种子萌发等方面的影响^[9]。盐生植物所具有的较强的耐盐性,可能也与其根际的许多特性有关。对根际微环境在荒漠盐生植物适应强盐碱、干燥和贫瘠的盐生荒漠土壤环境中的作用研究较少,而盐生植物的根际土壤特征可能是荒漠盐生植物有效吸收、利用土壤养分和适应盐渍环境的最直接表征之一。对于3种类型的盐生植物,它们的根际土壤特征是否相同,在对环境的适应中所起的作用等科学问题目前没有得到充分的认识。

本文采用盆栽根袋法研究了7种不同类型的荒漠盐生植物根际土壤养分和盐分的特征,以期初步探明不同类型的荒漠盐生植物根际土壤与土体之间养分和盐分的差异,了解根际微环境在荒漠盐生植物适应干旱、盐渍环境中的作用。

1 材料与方法

1.1 植物材料

本实验选用古尔班通古特沙漠南缘的7种最常见的盐生植物:梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bge.)、纳猪毛菜(*Salsola nitraria* Pall.)、囊果碱蓬(*Suaeda physophora* Pall.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.)、刚毛怪柳(*Tamarix hispida* Willd.)、琵琶柴(*Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim.)和芦苇(*Phragmites communis* Trin.)。其中梭梭、纳猪毛菜、囊果碱蓬和盐爪爪是稀盐盐生植物,刚毛怪柳和琵琶柴是泌盐盐生植物,芦苇是拒盐盐生植物。这些典型的荒漠盐生植物对干旱瘠薄的荒漠土壤环境有很强的适应性。供试植物种子于2005年10月在距中科院阜康荒漠生态试验站东南约3 km的盐生荒漠中采集。

1.2 植物的根袋培养及样品采集

试验采用盆栽根袋法模拟装置^[12]进行,所有实验均在温室内进行。供试土壤采集于上述供试盐生植物自然分布的荒漠中,土壤采集后在室内晾干,再粉碎并充分混匀,过0.5mm筛,然后加蒸馏水至土壤含水量

140g·kg⁻¹备用。将 30 μ m 孔径的尼龙网纱用塑料封口机制成直径 3cm 高 15cm 的根袋,保证供试植物根系不能生长出根袋,每个根袋内装入备好的土壤 240g,相同的供试土壤也装入高 40cm,直径 30cm 的盆中,然后在盆中央埋入备好的根袋一个。在每个根袋内播入露白的植物种子 15 粒,出苗后每个根袋留苗 6 株。生长期中每 15d 浇水一次,每个处理浇等量的蒸馏水 3L,其它不做任何处理。植物生长 100d 后,每种植物选择出苗和长势基本一致的 12 盆留作采样,即 12 个重复,当观察到所有植物的根系都完全充满根袋后,取出根袋中 2cm 以下的土壤作为根际土,土壤样品阴干后待测。另外设置 12 个没有埋放根袋的盆,实验期间的处理与根袋法的处理相同,在取根际土的同时取其中的土壤作为土体的土样(非根际土)。取根际土的同时挑取袋内的部分根系作为植物地下部分的测定样品,同时取植物地上部分待测。

1.3 样品中养分和盐分的测定

(1)土样按土水比 1:5 制备待测液,用于盐分测定。总盐分含量用干涸残渣法,pH 值用电位测定法;Na⁺ 和 K⁺ 用火焰光度计法;CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、和 Mg²⁺ 用土壤盐分常规滴定法。

(2)土壤养分测定方法 有机碳用重铬酸钾外热法;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;有效氮用碱解扩散法;有效磷用 Bray1 法;速效钾用乙酸铵浸提法。

(3)植物样品的测定 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的测定用 EDTA 络合滴定法;Cl⁻ 的测定用 AgNO₃ 滴定法;Na⁺ 和 K⁺ 的测定用火焰光度法;SO₄²⁻ 的测定用 EDTA 间接滴定法。

以上测定的具体方法见参考文献^[3]。

1.4 数据分析处理

数据采用 SPSS 12.0 进行方差分析和多重比较,用 Origin 7.0 和 Excel2003 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 根际土壤盐分含量的比较

从表 1 可以看出,7 种植物根际土壤的 pH 值相对土体都有所升高,但升幅不大,差异不显著,这是由于根际内 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 在根际内的少量富集造成的。除芦苇外,其余盐生植物的根际土中总盐、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 和 K⁺ 的含量都显著高于土体,在芦苇的根际,与土体相比,总盐和 8 种离子的含量也有所增加,但只有 Na⁺ 含量的增加达到了显著水平。梭梭、囊果碱蓬、有叶盐爪爪、钠猪毛菜、刚毛柽柳、琵琶柴和芦苇的根际土总盐含量比土体的增加量分别为:30.73%、107.57%、92.43%、61.02%、69.71%、48.11% 和 9.25%,这些表明荒漠盐生植物根际的盐分产生了富集,其中稀盐盐生植物和泌盐盐生植物根际盐分的富集程度显著高于拒盐盐生植物。土体中含量高的盐离子在根际中富集的量也高,所选用的盐土中的盐分以 Na⁺ 和 SO₄²⁻ 为主,而根际中的盐离子也以 Na⁺ 和 SO₄²⁻ 的富集量最高。

2.2 根际土壤盐分组成的比较

盐分组成是盐渍土的一个重要性质,盐分组成的改变可以影响盐对植物的危害程度,也影响盐渍土利用的难易程度。由表 1 可以看出,除芦苇外,其余 6 种植物根际土壤中 Cl⁻ 和 Na⁺ 的富集程度相对其它 6 种离子的富集程度高,比土体中相应的离子增加了 50%,囊果碱蓬和盐爪爪根际中的 Cl⁻ 含量比土体增加了 248.45% 和 169.59%。囊果碱蓬、盐爪爪、钠猪毛菜和刚毛柽柳根际中的 Na⁺ 含量比土体增加了 212.88%、148.05%、111.78% 和 130.83%。除钠猪毛菜外其余的稀盐盐生植物和泌盐盐生植物根际土中的 SO₄²⁻ / Cl⁻ 比土体有显著的降低,SO₄²⁻ / Cl⁻ 比的降低表明在这些植物根际 Cl⁻ 的富集程度比 SO₄²⁻ 高;拒盐盐生植物根际土盐分 SO₄²⁻ / Cl⁻ 比略有提高,显示在拒盐盐生植物芦苇的根际 SO₄²⁻ 的富集程度比 Cl⁻ 高。7 种植物根际土中的 Na⁺ / K⁺、Na⁺ / Ca²⁺、Na⁺ / Mg²⁺ 均较土体有显著的增加,芦苇根际土的 Na⁺ / K⁺、Na⁺ / Ca²⁺ 和 Na⁺ / Mg²⁺ 相对实验中的其它盐生植物增加最小。

2.3 根际土壤养分含量的比较

植物根际中有机碳的含量相对于土体都降低,除钠猪毛菜外,其余植物根际中有机碳含量的降低都不显著,根际中全 N 含量比土体的含量高,除刚毛柽柳外,其余六种植物都达到了显著水平,但全 P 和全 K 含量却

比土体的含量低,其中盐爪爪、钠猪毛菜和芦苇根际全 P 含量的降低达到了显著水平,而钠猪毛菜和芦苇根际土壤全 K 含量的降低达到了显著水平,说明根际微环境所发生的变化对土壤全态养分的活化有一定的作用,这已被许多研究所证实^[14]。

表 1 不同类型荒漠盐生植物根际土壤盐分比较

Table 1 Salt contents of rhizosphere soil from different type desert halophytes

项目 Item	土体 Bulk soil	根际土 Rhizosphere soil						
		梭梭 <i>Haloxylon ammoidendron</i> (C. A. Mey.) Bge.	囊果碱蓬 <i>Suaeda physophora</i> Pall.	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i> (Pall.) Moq.	钠猪毛菜 <i>Salsola nitriaria</i> Pall.	刚毛怪柳 <i>Tamarix hispida</i> Willd.	琵琶柴 <i>Reaumuria soongorica</i> (Pall.) Maxim.	芦苇 <i>Phragmites communis</i> Trin.
pH	8.64a	8.85a	8.98a	9.03a	8.87a	9.08a	9.01a	8.76a
总盐 (g·kg ⁻¹) Total salt	11.225f	14.675de	23.300a	21.600ab	18.075bc	19.050abc	16.625cd	12.276ef
CO ₃ ²⁻ (g·kg ⁻¹)	0.018a	0.019a	0.021a	0.021a	0.019a	0.020a	0.018a	0.016a
HCO ₃ ⁻ (g·kg ⁻¹)	0.186a	0.202a	0.214a	0.204a	0.200a	0.195a	0.207a	0.197a
Cl ⁻ (g·kg ⁻¹)	0.648e	0.873d	2.258a	1.747b	0.984d	1.085d	1.269cd	0.643e
SO ₄ ²⁻ (g·kg ⁻¹)	7.144d	8.684bc	12.977a	11.410a	10.487ab	10.588ab	10.440ab	7.795cd
Ca ²⁺ (g·kg ⁻¹)	1.480c	1.795ab	1.918a	1.766ab	1.836ab	1.790ab	1.877ab	1.602bc
Mg ²⁺ (g·kg ⁻¹)	0.192e	0.231c	0.242bc	0.258ab	0.274a	0.230c	0.235c	0.196de
Na ⁺ (g·kg ⁻¹)	1.638f	2.588d	5.125a	4.063b	3.469c	3.781bc	2.844d	2.238e
K ⁺ (g·kg ⁻¹)	0.149d	0.168c	0.220ab	0.223ab	0.159cd	0.213ab	0.198bc	0.165cd
SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻	11.024abc	9.947bcd	5.747e	6.531e	10.657abc	9.758cd	8.227d	12.123a
Na ⁺ / K ⁺	10.993g	15.975cd	23.295a	18.220b	21.818ab	17.751bc	14.364df	13.482f
Na ⁺ / Ca ²⁺	1.106e	1.442d	2.672a	2.300ab	1.889c	2.112bc	1.515d	1.397d
Na ⁺ / Mg ²⁺	8.531f	18.890bc	30.506a	15.748d	12.660e	16.439cd	19.087b	11.418e

* 表中小写字母表示各种指标在不同盐生植物之间差异显著性的检验结果 (SSR 法) $p < 0.05$,下同 The lowercases indicate significant differences between halophyte types at $p < 0.05$ level (SSR), and the same as in following

根际中有效态养分含量发生的变化则与全量养分相反。在所有供试植物中,根际中的有效 N 含量比土体中的都显著降低,除芦苇外,其余 6 种植物根际土壤的有效 P 和速效 K 的含量都高于土体,囊果碱蓬、盐爪爪和刚毛怪柳和琵琶柴根际土壤中的有效 P 含量显著高于土体,分别增加 26.49%、21.42%、17.09% 和 22.08%,而在芦苇根际土壤中则降低了 21.86%。梭梭、囊果碱蓬、盐爪爪、钠猪毛菜、刚毛怪柳和琵琶柴根际土壤中的速效 K 都显著高于土体,分别增加 21.66%、37.56%、49.31%、16.82%、32.48% 和 35.94%,而在芦苇根际土壤中则降低 6.68%。

在这 7 种供试植物根际土壤中有效 P 的富集不及有效 K 富集的程度高,钠猪毛菜根际的有效 N 亏缺的最高,有效 P 和速效 K 比其余植物富集的也最少,这可能是因为其是 1 年生草本植物,生长较快,吸收养分也较多。

2.4 植物体中的盐分状况

从图 1 可以看出,7 种植物的地上部分的主要盐离子含量比地下部分(根系)高,特别是 Cl⁻、Na⁺ 和 K⁺,其中 4 种稀盐盐生植物地上部主要盐离子的含量比其它两种类型的盐生植物都要高,拒盐盐生植物的增加量最小,这可能与它们各自的耐盐机制有关。结合图 1 和表 1 可以看出,在根际富集程度最高的 Cl⁻ 和 Na⁺,在植株的地上部分也增加的最大,尤其对于稀盐盐生植物和泌盐盐生植物。不同离子在地下部分(根系)的含量比较接近,但在地上部含量却差异很大,尤其对于稀盐盐生植物,说明植物吸收的盐分大部分运输到了地上部分。

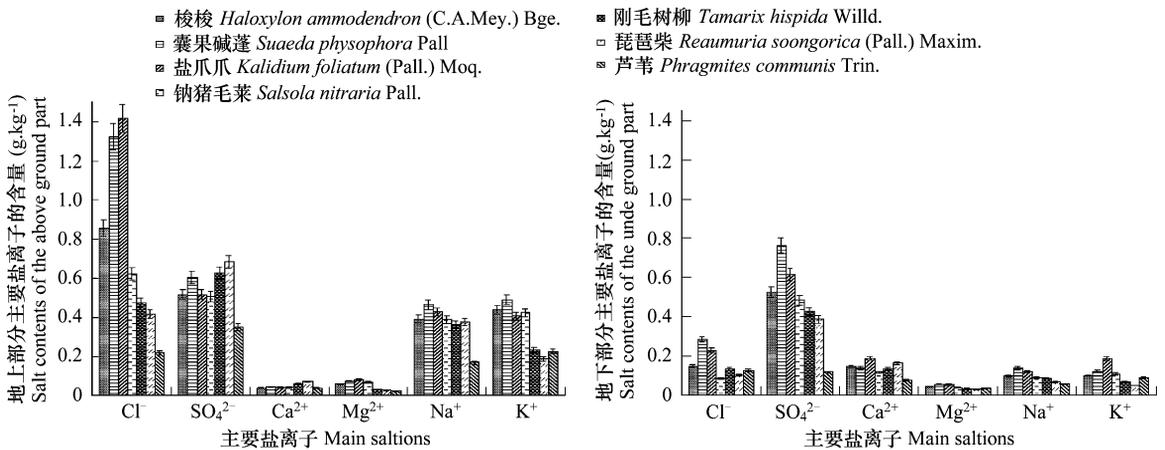


图1 不同类型荒漠盐生植物地上和地下部分主要盐离子的含量

Fig. 1 Main salt contents of plant from different type desert halophytes

3 讨论

丁应祥等^[15]以非盐生植物杨树为材料,研究了在滨海轻度盐渍化土壤上杨树根际土盐分含量的变化,结果表明,根际土壤总盐、盐分率均高于非根际土,另外一些以非盐生植物为材料进行的研究也表明,植物根际有盐分积聚现象^[16,17],并认为根际土壤盐分含量的提高可能缘于植物对盐分的选择吸收以及盐分向根际运输的速率。沈其荣^[17]等研究了2种耐盐能力相差较大的大麦栽培品种根际及土体pH值和盐离子的分布特征,结果表明,与土体比较,耐盐能力较强的大麦品种根际中除 K^+ 亏缺外, HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 均有富集,而耐盐能力较弱的大麦根际 K^+ 和 Na^+ 有亏缺,其它离子则有不同程度的富集,但除 HCO_3^- 外,亏缺和富集的程度都不及耐盐大麦显著。

根际土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^[18]。溶液中的盐分通过质流到达根表,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。从根际 SO_4^{2-}/Cl^- 、 Na^+/K^+ 、 Na^+/Ca^{2+} 和 Na^+/Mg^{2+} 来看,荒漠中的盐生植物吸收 SO_4^{2-} 的速率大于 Cl^- ,而吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的速率大于 Na^+ ,因而使得根际 Cl^- 和 Na^+ 的富集更为明显。

通过对几种盐生植物根际盐分特征的比较,对比以往植物耐盐性的研究成果^[9,19],耐盐能力越强的盐生植物,其根际的盐分富集程度也更大,本研究的几种荒漠盐生植物,囊果碱蓬和盐爪爪有较强的耐盐能力,其根际的盐浓度也较高,芦苇的耐盐性最小,其根际的盐分浓度也最低,根际盐分的富集程度与耐盐能力正相关,这也与非盐生植物类似。从形态学、生态学和生理学上对比,盐生植物和非盐生植物在许多指标上只是量的差异,而没有质的不同^[20],在根际上的研究也体现了这一点。

根际中全N含量有所增加,这可能是由于根系含氮分泌物及根的死亡、根毛组织表皮的脱落物和微生物在根际聚集的结果^[21,22]。全P和全K的含量下降,可能是根际土壤中养分的活化,使得一部分缓效态养分转化成为速效态的养分而被植物所吸收造成的^[23]。

当根系对养分吸收速率快于对水分吸收速率时,根际养分浓度将低于土体,反之,质流输送到根表的养分多于根系的需求时,根际养分浓度将高于土体^[24]。荒漠盐生植物根际养分与前人研究的非盐生植物根际的养分状况有所不同,在前人对非盐生植物的研究中,根际的速效P和速效K有很显著的亏缺^[25,26],而本实验的结果表明(表2)除芦苇外,其余植物根际土壤中有效P和速效K含量都比土体中的含量高,在一些植物中还达到了显著的水平。通过比较本研究所用植物根际土壤中盐分 and 不同养分之间的关系,发现总盐与有效P的相关系数是0.79,总盐与速效K的相关系数是0.86,根际中盐分的浓度与速效养分有较强的相关性。由于荒漠盐生植物所生长的土壤含水量低,根际的高渗透势环境使得土体中的水分向根际移动较快,因此随质流

输送到根际的养分也相对较多,且荒漠植物生长缓慢,吸收养分的速度也相对较慢,使得其根际速效养分亏缺的程度比非盐生植物小,然而,由于没有根际内不同部位水分含量的数据,结论尚需进一步实验证实。由于植物的生长对 N 的需求较大,而荒漠土壤中的有效 N 含量又很低,因此有效 N 在这些荒漠盐生植物的根际土壤中都显著亏缺。

表 2 不同类型盐生植物根际土壤养分含量的比较

Table 2 Nutrient contents of rhizosphere soil from different type desert halophytes

项目 Item	土体 Bulk soil	根际土 Rhizosphere soil						
		梭梭 <i>Haloxylon ammooendron</i> (C. A. Mey.) Bge.	囊果碱蓬 <i>Suaeda physophora</i> Pall.	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i> (Pall.) Moq.	钠猪毛菜 <i>Salsola nitriaria</i> Pall.	刚毛怪柳 <i>Tamarix hispidia</i> Willd.	琵琶柴 <i>Reaumuria soongorica</i> (Pall.) Maxim.	芦苇 <i>Phragmites communis</i> Trin.
有机碳 (g·kg ⁻¹) Organic carbon	3.083b	2.966b	2.751b	2.845b	2.452a	2.985b	2.874b	2.769b
全 N Total N (g·kg ⁻¹)	0.316d	0.387ab	0.395ab	0.414a	0.374bc	0.343cd	0.390ab	0.389ab
有效 N (mg·kg ⁻¹) Available P	33.18a	24.11b	24.21b	25.56b	13.56c	23.14b	23.65b	25.01b
全 P Total P (g·kg ⁻¹)	0.867a	0.776abcd	0.816ab	0.686e	0.733de	0.796abc	0.804abc	0.753cde
有效 P (mg·kg ⁻¹) Available K	13.63d	14.92cd	17.24a	16.55b	14.51d	15.96bc	16.64b	10.65e
全 K (g·kg ⁻¹) Total K	18.454a	16.384abc	17.741abc	16.808abc	15.097c	16.563abc	17.385abc	15.419bc
速效 K (mg·kg ⁻¹) Available K	434de	528bc	597ab	648a	507c	575bc	590ab	405e

通过比较几种不同类型盐生植物的根际盐分和养分特征,发现其根际特征具有很多相似之处,特别是稀盐盐生植物和泌盐盐生植物,这反映了有些类型的盐生植物虽然其生理上适应盐环境的方式不同,但其根际却具有趋同适应的特征。而芦苇根际土壤中的有效 P 和速效 K 的状况与本研究中其它盐生植物有显著的差异,却与许多非盐生植物的根际特征类似。

根系生长在地下,研究起来较为困难,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,更易对土壤环境做出反应^[27]。已有研究表明,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系统,使之在生理水平和形态水平上进行适应性反应,以增强在胁迫条件下的生存机会^[28]。从植物-根际-土体这一系统来看,荒漠盐生植物根际土壤中盐分和养分的富集或亏缺,在植物吸收盐分和养分的过程中起到了“盐泵”、“营养泵”的作用,这可能是干旱荒漠区盐生植物适应干旱,贫瘠的荒漠土壤环境的有效方式之一,对于荒漠盐生植物的耐盐耐旱机制至关重要。

References :

- [1] Toal M E, Yeomans C V, Killham K S *et al.* A review of rhizosphere carbon flow modeling. *Plant and Soil* 2000 222 263—281.
- [2] Benizri E, Schoeny A, Picard C *et al.* External and internal root colonization of maize by two pseudomonas strains : enumeration by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). *Current Microbiology* 1997 34 297—302.
- [3] Cheng H. Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year-old Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *Forest Ecology Manage* , 2003 178 301—310.
- [4] Darrah P R. The rhizosphere and plant nutrition : A quantitative approach. *Plant and Soil* 1993 155/156 1—20.
- [5] Li Y X, Ma G R. Nutrition of potassium in rhizosphere and characteristics of roots in different grain amaranth genotypes. *Journal of Soil and Water Conservation* 2004 18 (3) 90—93.
- [6] Gregory P J, Hinsinger P. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere : an overview. *Plant and Soil* 1999 21 1—9.

- [7] Guo T C, Song X, Ma D Y *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on soil enzymatic activity and rhizosphere microorganisms of wheat. *Journal of Soil and Water Conservation* 2006 20 (3) :129—131.
- [8] Breckl S W. How do halophytes overcome salinity? In : Khan M. I. Ed. *Biology of salt-tolerant plants*. Michigan USA, 1995, 199—213.
- [9] Zhao K F, Fan H. Halophytes and Their adaptive physiology to salt habitat. Beijing Science Press 2005. 72.
- [10] Zhang B Q. Soil Stalination and its prevention in Xinjiang. *Arid Zone Research* 1993 10 (1) :66—71
- [11] Zhou S, Han J L, Zhao K F. Advance of study on recretohalophytes. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* 2001 7 (5) :496—501.
- [12] 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.
- [13] Bao S D. *Soil Chemical Analysis of Agriculture* (Fourth Edition). Beijing :China Agriculture Press 2000. 12—21 2000.
- [14] Zeng S C, Su Z Y, Chen B G *et al.* A review on the rhizosphere nutrition ecology research. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* 2003 27 (6) :79—83.
- [15] Ding Y X, Liang Z H, Kang L X. Properties of rhizosphere of Poplar on marine soil. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* 1996 20 (2) :15—19.
- [16] 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.
- [17] Shen Q R, Wang J L. Distribution characteristics of ions in the rhizosphere of two barley varieties with different salinity tolerance. *Acta Pedologica Sinica* 1993 30 (4) :366—373.
- [18] Li J H, Yu R P. Ion transport in soil-crop rhizosphere system under different conditions. *Acta Pedologica Sinica* 1998 35 (2) :186—194.
- [19] Sun L, Xiao L. Studies on the activity and isozyme of superoxide dismutase in chenopodiacea saline species. *Journal of Shihezi University (Natural Science)* 2004 22 (6) :500—503.
- [20] Munns R, Greenway H, Kirst GO. *Halotolerant eukaryotes*. In : Lange O. *et al.* eds. *Physiological Plant Ecology. Responses to the chemical and biological environment*. Encyclopedea of plant physiol. New series. 12C. Berlin :Springer-Verlag 1983. 50—55.
- [21] Zhang F S. Root exudates and their roal in plant nutrition. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis* 1991 17 (2) :63—67.
- [22] Li W H. Studies on the differences of soil nitrogen and pH of rhizospheres and non-rhizospheres under oak, Chinese fir and loblolly. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* 1996 20 (2) :49—52.
- [23] Hinsinger P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advances in Agronomy* 1998 64 :225—265.
- [24] Shi R H. *The Principles of Plants Nutrients*. Nanjing Jiangsu Science and Technology Publishing House 1989. 92—93.
- [25] Philippe H, Claude P, Benoit J. Rhizosphere : A new frontier for soil biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 2005 88 :210—213.
- [26] Clegg S, Gobran G R. Rhizospheric P and K in forest soil manipulated with ammonium sulfate and water. *Canadian Journal of Soil Science* 1997 77 :525—533.
- [27] Lynch J P. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology* 1995 109 :7—13.
- [28] Feng F, Zhang F S, Yang X Q. *Plant Nutriology — Advances and Prospects*. Beijing :China Agricultural University Press 2000. 12—21.

参考文献 :

- [5] 李廷轩, 马国瑞. 籽粒苋不同富钾基因型根际钾营养与根系特性研究. *水土保持学报* 2004 18 (3) :90~93.
- [7] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 氮素营养水平对小麦根际微生物及土壤酶活性的影响. *水土保持学报* 2006 20 (3) :129~131.
- [9] 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理. 北京 : 科学出版社 2005. 72.
- [10] 张丙乾. 新疆土壤盐碱化及其防治. *干旱区研究* 1993 10 (1) :66~71.
- [11] 周三, 韩军丽, 赵可夫. 泌盐盐生植物研究进展. *应用与环境生物学报* 2001 7 (5) :496~501.
- [13] 鲍士旦. *土壤农化分析* (第3版). 北京 : 中国农业出版社 2000.
- [14] 曾曙才, 苏志尧, 陈北光, 等. 植物根际营养研究进展. *南京林业大学学报 (自然科学版)* 2003 27 (6) :79~83.
- [15] 丁应祥. 滨海土壤上杨树根际微区性状的研究. *南京林业大学学报 (自然科学版)* 1996 20 (2) :15~19.
- [17] 沈其荣, 王建林. 两种不同耐盐大麦根际中离子的分布特征. *土壤学报* 1993 30 (4) :366~373.
- [18] 李加宏. 土壤-作物根际系统中离子的迁移. *土壤学报* 1998 35 (2) :186~194.
- [19] 孙黎, 刘士辉, 师向东, 等. 10 种藜科盐生植物的抗盐生理生化特征. *干旱区研究* 2006 23 (2) :309~313.
- [21] 张福锁. 根分泌物及其在植物营养中的作用. *北京农业大学学报* 1991 17 (2) :63~67.
- [22] 厉婉华. 栓皮栎、杉木和火炬松根际与非根际土壤氮素及 pH 差异的研究. *南京林业大学学报 (自然科学版)* 1996 20 (2) :49~52.
- [24] 史瑞和. *植物营养原理*. 南京 : 江苏科学技术出版社 1989. 92—93.
- [28] 冯锋, 张福锁, 杨新泉. *植物营养研究——进展与展望*. 北京 : 中国农业大学出版社 2000. 12~21.