

阿拉善荒漠灌木根际中、微量元素含量特征

任 伟, 周志宇*, 詹媛媛, 薛梓瑜

(兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000)

摘要:探讨了阿拉善干旱荒漠区霸王、白刺、红砂、沙冬青、沙木蓼、梭梭和驼绒藜 7 种旱生灌木根际与非根际土壤 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 的含量特征。结果表明:(1)除梭梭根际 pH 值高于非根际之外,其余 6 种灌木根际土壤均表现出不同程度的酸化作用。(2)7 种灌木根际全钙和交换性钙的含量均低于非根际。除沙木蓼和驼绒藜外,其余 5 种灌木根际全镁含量均高于非根际,白刺的富集率最高,为 43.04%;除沙木蓼外,其余灌木根际交换性镁的含量均有所富集,梭梭的富集率最高,为 26.52%。(3)7 种灌木根际全铁、全锰、全锌含量总体上小于非根际,但是根际有效铁、有效锰、有效锌含量均大于非根际,表现出明显的富集效应,沙木蓼根际有效铁、有效锰、有效锌的富集率最高,分别为:29.76%、20.92%、86.99%。(4)沙木蓼根际全铜和有效铜含量略高于非根际。梭梭根际全铜含量低于非根际,但梭梭根际有效铜含量却有富集的趋势。其余五种灌木根际全铜和有效铜含量均低于非根际。(5)根际及非根际土壤各养分性状之间,存在复杂的相关性。

关键词:旱生灌木;根际效应;中量元素;微量元素

文章编号:1000-0933(2009)07-3759-09 中图分类号:Q143 文献标识码:A

The characteristics of medium and trace element concentrations in the rhizosphere of desert shrubs, Alxa

REN Wei, ZHOU Zhi-Yu*, ZHAN Yuan-Yuan, XUE Zi-Yu

College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3759 ~ 3767.

Abstract: The characteristics of Ca, Mg, Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in the rhizosphere and the rhizosphere-surrounded bulk soil of the 7 desert shrubs (i. e. *Zygophyllum xanthoxylum*, *Nitraria tangutorum*, *Reaumuria soongorica*, *Ammopiptanthus mongolicus*, *Atraphaxia bracteata*, *Haloxylon ammodendron*, *Ceratoides lateus*) in Alxa were investigated. The results revealed as follows. (1) Although pH value in the *Haloxylon ammodendron* rhizosphere was higher than that of the bulk soil, the other six shrubs showed varying degrees of acidification in the rhizosphere soil. (2) Contents of the total Ca and exchangeable Ca in the rhizosphere of all the seven shrubs were lower than those of the bulk soils. The total Mg content was higher in the rhizosphere than in the bulk soil for all shrubs except *Atraphaxia bracteata* and *Ceratoides lateus*, and the highest enrichment rate occurred in *Nitraria tangutorum* (43.1%). The exchangeable Mg content was significantly accumulated in the rhizosphere except for *Atraphaxia bracteata*, with *Haloxylon ammodendron* having the highest enrichment rate of 26.5%. (3) Overall, the contents of total Fe, Mn and Zn in the rhizosphere were lower than those of the bulk soil, but there was a significant rhizosphere effect on the contents of available Fe, Mn and Zn whose enrichment rates in the rhizosphere of *Atraphaxia bracteata* were 29.8%, 20.9% and 86.9%, respectively. (4) Contents of the total Cu and available Cu in the *Atraphaxia bracteata* rhizosphere were slightly higher than in the bulk soil. The content of total Cu in the *Haloxylon ammodendron* rhizosphere decreased, but the content of available Cu in its rhizosphere increased. Contents of the total Cu and available Cu in the rhizosphere for the other shrubs were lower than those in the bulk soil. (5) There was a complicated correlation between soil nutrients in the rhizosphere and the bulk soil.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30800801)

收稿日期:2009-02-03; 修订日期:2009-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyzhou@lzu.edu.cn

Key Words: desert shrub; rhizosphere effect; medium elements; trace elements

阿拉善干旱荒漠区是我国典型的荒漠生态系统,它不仅是我国北方重要的生态屏障,也是我国六大生物多样性中心之一。在这一区域由于特殊的自然生态背景使之成为灌木种类的“天然王国”。拥有 23 科 57 属 137 种灌木、半灌木。灌木是荒漠植被的主要组分,它在维持荒漠生态系统生物多样性、生态服务功能及其稳定性方面具有十分重要作用。因此,倍受国内外科学家的关注。

根际(rhizosphere)的概念最早由 Hiltner 于 1940 年提出^[1],已经发展成为一门独立而系统的科学——根际生物学。根际是指与植物根系发生紧密相互作用的土壤微域环境,是植物在其生长、吸收、分泌过程中形成的物理、化学、生物学性质不同于原土体的、复杂的、动态的微型生态系统。它对植物的生长发育起着至关重要的作用,因而成为当前植物营养学、生态学研究领域中的前沿与热点,主要包括:植物吸收重金属以及有机污染物的根际微生态效应^[2~4];菌根对于植物获取难溶态营养物质的根际效应^[5~8];植物根际细菌诱导植物抗病性的研究^[9];植物根际土壤养分效率的研究^[10~12]。

目前,对于农作物和一些模式作物根际养分的研究,已经取得了许多进展和结果^[13,14],而干旱荒漠区旱生灌木根际养分的研究则比较少。因而,掌握不同旱生灌木根际养分的含量特征,对于研究荒漠植物适应干旱环境的耐旱机制、干旱荒漠区植被的演替与重建、植物根际的生理生化反应过程以及提高植物抗逆性等方面起着至关重要的作用。弋良朋、Su、黄刚和 Garcia 等人的研究结果表明灌木根际有机质、大量元素和 pH 值表现出明显的富集效应^[15~18],郝金标研究发现盐生灌木根际土盐分有降低趋势^[19]。但是有关旱生灌木根际微量元素含量的研究,还鲜见报道。

鉴于此,本研究对阿拉善干旱荒漠区 7 种旱生灌木根际土壤 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 的含量特征进行了探讨,分析了不同灌木对以上 6 种营养元素吸收利用的差异性,揭示了不同灌木根际中、微量元素的含量特征,为今后更进一步了解根际在荒漠植物适应干旱环境的作用机理和丰富植物营养学的理论提供基础性资料。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于阿拉善左旗李井滩,地处腾格里沙漠东部边缘。地理坐标为北纬 39°08',东经 105°36',海拔 1370m。属于典型的中温带干旱区。全年无霜期达 120~180d,平均结冰期 160d。平均气温 8.3℃。≥10℃积温一般为 3200~3600℃,极端低温 -32.2℃,极端高温 41℃。年均降水量 100~150mm,主要集中在 7、8、9 三月份,占全年降水量的 59%~75%。年蒸发量 3000~4700mm,瞬时风速 >17m/s,大于 7.8 级的大风日数达 47d。植物组成主要以旱生、超旱生灌木、半灌木为主,多年生禾本科和豆科植物较少,主要建群植物以藜科、菊科、蒺藜科居多,其次为蔷薇科、柽柳科,禾本科草类仅在水分条件较好的局部地区占优势,形成荒漠特有的植被景观。大多植株矮小,根系发达,能够防止强光灼伤和耐盐耐旱。土壤为淡棕钙土^[1]。

1.2 植物材料

在试验区选择以不同灌木为主的 7 个样地,各样地分别以白刺(*Nitraria tangutorum*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、沙木蓼(*Atraphaxia bracteata*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*) 7 种旱生灌木为主。每个样地 100m×100m,在样地内选取 7 株中等大小的成年样株供采样分析,采样灌丛的形态特征和生长状况列于表 1。

1.3 土壤样品的采集

先用铁锹铲去落叶层,然后用不锈钢土壤刀从植株基部开始逐段、逐层挖去上层覆土,追踪根系的伸展方向,然后沿侧根找到须根部分,平均取样深度为灌丛下 10~30cm,剪下分枝,轻轻抖动后落下的土壤为非根际土壤(标记为 B),仍粘在根上的为根际土壤(标记为 R),用毛刷收集到土壤袋保存,供分析用^[20,21]。

将野外带回的样品敞开放置在干燥通风的室内,使其自然风干,并要注意防止污染。样品风干后,拣去动植物残体、杂质、根系和石块,用于全量测定的土壤过 0.4mm 的分样筛,用于有效量和 pH 测定的土壤过 2mm

的分样筛,分别装袋储藏备用。

表 1 灌木形态特征和生长状况
Table 1 Morphological traits and growing condition of shrubs

种名 Species	科 Family	高度 Height (cm)	冠幅 Crown diameter (cm)	茎数 Number of shoots	生长状况 Growing condition
白刺 <i>N. tangutorum</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	57 ~ 60	738 ~ 745	380 ~ 392	旺盛 Luxuriance
霸王 <i>Z. xanthoxylum</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	94 ~ 99	119 ~ 120	5 ~ 8	旺盛
红砂 <i>R. songorica</i>	怪柳科 Tamaricaceae	38 ~ 41	139 ~ 157	61 ~ 65	旺盛
沙冬青 <i>A. mongolicus</i>	豆科 Leguminosae	106 ~ 110	242 ~ 250	13 ~ 15	旺盛
沙木蓼 <i>A. bracteata</i>	蓼科 Polygonaceae	33 ~ 38	66 ~ 76	14 ~ 16	旺盛
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	藜科 Chenopodiaceae	76 ~ 82	85 ~ 100	8 ~ 9	旺盛
驼绒藜 <i>C. latens</i>	藜科 Chenopodiaceae	50 ~ 53	57 ~ 63	24 ~ 29	旺盛

1.4 样品中元素和 pH 的测定

全量的测定:采用 HNO₃-HCl-HF 消化法进行消解,AAS 法测定(Thermo, M series)。交换性 Ca、Mg 采用乙酸铵(调节 pH 至 8.0)振荡浸提^[22],有效 Fe、Mn、Cu、Zn 采用 DTPA 法振荡浸提,AAS 法测定(Thermo, M series)。pH 值采用电位法(土水比 1:5)测定。

1.5 数据分析

采用 SPSS16.0 进行统计分析,不同灌木根际与非根际土壤养分之间用配对样本 *T*-检验进行差异性分析;根际及非根际土壤各养分性状之间分别作相关性分析;用“富集率”表示根际对土壤养分的富集程度,从而反映根际效应的强弱,用 *E*(Enrichment ratio)来表示:

$$E = [(\text{根际含量} - \text{非根际含量}) / \text{非根际含量}] \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 不同灌木根际与非根际土壤 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 全量的含量特征

由表 2 可知,7 种灌木根际全钙含量均低于非根际,霸王、红砂和驼绒藜达显著水平。沙木蓼和驼绒藜根际全镁含量显著低于非根际,其余 5 种灌木根际全镁含量表现出不同程度的富集,白刺的富集率最高,为 43.04%,其次为霸王 13.12%,且差异显著。除沙木蓼外,其余 6 种灌木根际全铜含量均低于非根际,霸王和红砂差异显著。7 种灌木根际全铁含量表现出与全铜相同的变化趋势,红砂、梭梭和驼绒藜差异显著。霸王和白刺根际全锰含量略高于非根际,差异不显著,其余 5 种灌木根际全锰含量均低于非根际,其中沙木蓼和梭梭差异显著。沙冬青和沙木蓼根际全锌含量略高于非根际,差异不显著,其余 5 种灌木均为根际低于非根际,红砂和驼绒藜达显著水平。

2.2 不同灌木根际与非根际土壤 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 有效含量特征

7 种灌木根际 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 有效量的含量特征与全量有所不同(表 3)。7 种灌木根际交换性钙的含量均低于非根际,霸王、红砂、沙木蓼和梭梭都达到了显著水平。除沙木蓼外,其余灌木根际交换性镁的含量均有所富集,富集率依次为:梭梭 > 霸王 > 红砂 > 沙冬青 > 白刺 > 驼绒藜,其中梭梭、霸王和红砂差异显著,富集率分别为 26.52%、21.54%、15.82%。沙木蓼和梭梭根际有效铜含量有富集的趋势,但是差异不显著,其余灌木均为根际低于非根际,其中霸王、红砂、沙冬青和驼绒藜差异显著。7 种灌木根际有效铁含量均高于非根际土壤,富集率依次为:沙木蓼 > 霸王 > 梭梭 > 白刺 > 红砂 > 驼绒藜 > 沙冬青,其中沙木蓼和霸王差异显著,富集率分别为 29.76% 和 10.84%。7 种灌木根际有效锰和有效锌含量均表现出明显的富集作用,有效锰的富集率依次为:沙木蓼 > 梭梭 > 沙冬青 > 驼绒藜 > 白刺 > 红砂 > 霸王,除沙冬青和霸王外,其余灌木差异显著,沙木蓼富集率最高,为 20.92%;有效锌的富集率依次为:沙木蓼 > 霸王 > 驼绒藜 > 沙冬青 > 红砂 > 梭梭 > 白刺,除梭梭和白刺外,其余灌木差异显著,沙木蓼富集率最高,为 86.99%。

表 2 不同灌木根际与非根际土壤全量微量元素含量及富集率

Table 2 The total content of soil nutrients and enrichment ratios in rhizosphere and bulk soil for different shrubs

灌木种类 Shrubs	部位 Position	全钙(g/kg) Total Ca	全镁(g/kg) Total Mg	全铜(mg/kg) Total Cu	全铁(g/kg) Total Fe	全锰(g/kg) Total Mn	全锌(g/kg) Total Zn
霸王	R	5.996 ± 0.152	4.905 ± 1.056	6.190 ± 0.515	18.342 ± 1.880	0.294 ± 0.044	0.047 ± 0.007
<i>Z. Xanthoxylum</i>	B	7.635 ± 0.553	4.336 ± 1.128	7.431 ± 0.842	19.255 ± 1.505	0.282 ± 0.043	0.050 ± 0.008
	E(%)	-21.459 *	13.115 *	-16.698 *	-4.741	4.350	-4.342
白刺	R	3.547 ± 0.305	3.583 ± 0.601	5.153 ± 0.407	14.119 ± 1.092	0.207 ± 0.017	0.035 ± 0.002
<i>N. tangutorum</i>	B	4.388 ± 0.263	2.505 ± 0.671	5.206 ± 0.514	15.237 ± 0.843	0.199 ± 0.019	0.037 ± 0.002
	E(%)	-19.174	43.042	-1.014	-7.339	4.227	-5.017
红砂	R	5.122 ± 0.317	4.594 ± 0.475	6.461 ± 0.386	16.389 ± 0.759	0.283 ± 0.014	0.034 ± 0.002
<i>R. soongo rica</i>	B	5.950 ± 0.427	4.519 ± 0.672	7.705 ± 0.741	17.594 ± 0.896	0.299 ± 0.017	0.037 ± 0.002
	E(%)	-13.926 *	1.658	-16.145 *	-6.852 *	-5.333	-8.245 *
沙冬青	R	3.385 ± 1.243	3.165 ± 0.626	6.691 ± 0.737	15.606 ± 1.082	0.248 ± 0.025	0.034 ± 0.003
<i>A. mongolicus</i>	B	4.801 ± 1.227	2.889 ± 0.339	7.915 ± 0.540	17.684 ± 2.327	0.283 ± 0.051	0.034 ± 0.004
	E(%)	-29.492	9.532	-15.464	-11.750	-12.544	0.728
沙木蓼	R	8.005 ± 0.120	2.107 ± 0.904	4.834 ± 0.850	11.173 ± 1.774	0.441 ± 0.063	0.028 ± 0.006
<i>A. bracteata</i>	B	8.568 ± 0.271	2.455 ± 0.979	4.527 ± 0.478	10.893 ± 1.617	0.549 ± 0.065	0.027 ± 0.004
	E(%)	-6.578	-14.195	6.778	2.571	-19.644 *	7.000
梭梭	R	8.112 ± 0.124	3.145 ± 0.229	3.815 ± 0.697	11.480 ± 1.495	0.269 ± 0.062	0.020 ± 0.007
<i>H. ammodendron</i>	B	8.714 ± 0.382	3.142 ± 0.093	4.327 ± 0.718	14.216 ± 0.919	0.335 ± 0.029	0.021 ± 0.004
	E(%)	-6.912	0.097	-11.831	-19.248 *	-19.595 *	-4.251
驼绒藜	R	7.840 ± 1.072	5.526 ± 0.417	6.640 ± 0.197	17.528 ± 0.610	0.295 ± 0.024	0.044 ± 0.002
<i>C. latens</i>	B	9.691 ± 0.762	6.284 ± 0.547	6.854 ± 0.349	18.662 ± 0.688	0.303 ± 0.018	0.050 ± 0.004
	E(%)	-19.101 *	-12.061 *	-3.116	-6.080 *	-2.667	-10.505 *

R:根际 Rhizosphere, B:非根际 Bulk soil; *:表示同一灌木根际与非根际土壤差异显著 ($p < 0.05$) There is a significant difference between rhizosphere and bulk soil ($p < 0.05$); 下同 the same below

表 3 不同灌木根际与非根际土壤有效微量元素含量及富集率

Table 3 The available content of soil nutrients and enrichment ratios in rhizosphere and bulk soil for different shrubs

灌木种类 Shrubs	部位 Position	交换性钙(g/kg) Exchangeable Ca	交换性镁(g/kg) Exchangeable Mg	有效铜(mg/kg) Available Cu	有效铁(mg/kg) Available Fe	有效锰(mg/kg) Available Mn	有效锌(mg/kg) Available Zn
霸王	R	2.294 ± 0.656	0.211 ± 0.016	0.096 ± 0.015	1.976 ± 0.120	3.049 ± 0.117	0.224 ± 0.030
<i>Z. Xanthoxylum</i>	B	3.046 ± 0.670	0.174 ± 0.032	0.136 ± 0.024	1.783 ± 0.138	2.981 ± 0.196	0.172 ± 0.013
	E(%)	-24.708 *	21.536 *	-29.440 *	10.841 *	2.281	30.434 *
白刺	R	1.616 ± 0.403	0.201 ± 0.036	0.087 ± 0.022	2.081 ± 0.209	3.065 ± 0.109	0.206 ± 0.027
<i>N. tangutorum</i>	B	1.759 ± 0.337	0.181 ± 0.014	0.094 ± 0.025	1.990 ± 0.173	2.682 ± 0.107	0.202 ± 0.019
	E(%)	-8.093	11.302	-7.295	4.550	14.276 *	1.814
红砂	R	2.302 ± 0.162	0.320 ± 0.042	0.077 ± 0.017	1.820 ± 0.134	3.470 ± 0.734	0.339 ± 0.014
<i>R. soongo rica</i>	B	2.461 ± 0.193	0.277 ± 0.038	0.090 ± 0.014	1.785 ± 0.134	3.134 ± 0.611	0.310 ± 0.019
	E(%)	-6.464 *	15.819 *	-15.194 *	1.954	10.712 *	9.246 *
沙冬青	R	1.647 ± 0.422	0.150 ± 0.016	0.058 ± 0.005	2.058 ± 0.108	2.499 ± 0.272	0.216 ± 0.007
<i>A. mongolicus</i>	B	2.186 ± 1.070	0.130 ± 0.021	0.095 ± 0.009	2.062 ± 0.086	2.124 ± 0.351	0.192 ± 0.004
	E(%)	-24.642	15.500	-39.681 *	-0.217	17.626	12.569 *
沙木蓼	R	2.960 ± 0.337	0.172 ± 0.033	0.078 ± 0.018	0.850 ± 0.014	4.812 ± 0.129	0.157 ± 0.018
<i>A. bracteata</i>	B	3.428 ± 0.471	0.206 ± 0.033	0.074 ± 0.020	0.655 ± 0.015	3.980 ± 0.193	0.084 ± 0.008
	E(%)	-13.643 *	-16.604 *	5.789	29.763 *	20.921 *	86.986 *
梭梭	R	2.752 ± 0.281	0.191 ± 0.012	0.113 ± 0.021	1.287 ± 0.116	2.569 ± 0.167	0.109 ± 0.010
<i>H. ammodendron</i>	B	3.058 ± 0.261	0.151 ± 0.018	0.095 ± 0.028	1.194 ± 0.141	2.144 ± 0.117	0.101 ± 0.012
	E(%)	-9.999 *	26.522 *	18.156	7.777	19.819 *	7.773
驼绒藜	R	3.004 ± 0.447	0.259 ± 0.040	0.098 ± 0.017	1.765 ± 0.109	3.003 ± 0.107	0.247 ± 0.006
<i>C. latens</i>	B	3.280 ± 0.278	0.250 ± 0.031	0.132 ± 0.033	1.756 ± 0.070	2.605 ± 0.105	0.213 ± 0.003
	E(%)	-8.423	3.734	-25.525 *	0.505	15.277 *	16.015 *

2.3 不同灌木根际与非根际土壤 pH 值的变化

7 种灌木中除梭梭根际 pH 值高于非根际之外,其余 6 种灌木根际土壤都表现出不同程度的酸化作用(图 1),根际 pH 的降幅由大到小依次为:红砂 > 霸王 > 驼绒藜 > 沙木蓼 > 沙冬青 > 白刺,其中前三者还达到了显著水平。梭梭的根际 pH 值最高为 9.43,白刺的根际 pH 值最低为 8.40。pH 值的差异性必将影响根际养分的吸收利用。

2.4 根际及非根际土壤各养分性状之间的相关性分析

在根际和非根际,钙镁两种元素的全量与交换性含量之间均为极显著正相关性。铜元素根际全量与有效量之间呈极显著负相关性,但是在非根际呈现出显著正相关性。铁和锌根际全量与有效量之间没有相关性,但是在非根际却呈显著正相关性。锰元素不论在根际还是非根际,全量与有效量之间均没有相关性。此外,在各个元素彼此之间存在复杂的相关性(表 4,表 5)。

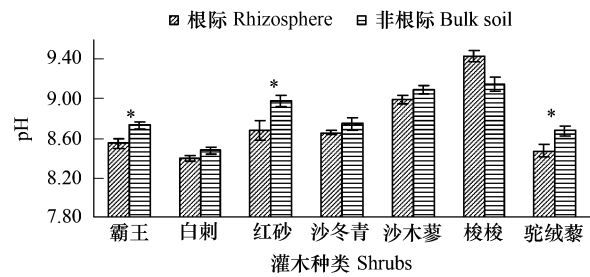


图 1 不同灌木根际与非根际土壤的 pH 值

Fig. 1 The pH in rhizosphere and bulk soil for different shrubs

* :表示同一灌木根际与非根际土壤差异显著 ($p < 0.05$); * : There is a significant difference between rhizosphere and bulk soil ($p < 0.05$)

表 4 根际各养分性状间的相关性分析

Table 4 Correlation coefficients between rhizosphere soil nutrients

项目 Item	全钙 Total Ca	全镁 Total Mg	全铜 Total Cu	全铁 Total Fe	全锰 Total Mn	全锌 Total Zn	有效钙 Available Ca	有效镁 Available Mg	有效铜 Available Cu	有效铁 Available Fe	有效锰 Available Mn	有效锌 Available Zn
全钙	1.000											
全镁	0.054	1.000										
全铜	-0.243	0.700 **	1.000									
全铁	-0.194	0.851 **	0.902 **	1.000								
全锰	0.745 **	-0.101	-0.235	-0.246	1.000							
全锌	-0.134	0.672 **	0.836 **	0.859 **	-0.127	1.000						
有效钙	0.743 **	0.143	-0.169	-0.099	0.552 **	-0.060	1.000					
有效镁	0.066	0.439 **	0.282	0.278	-0.072	0.068	0.282	1.000				
有效铜	0.546 **	-0.188	-0.439 **	-0.322	0.415 *	-0.159	0.448 **	-0.177	1.000			
有效铁	-0.343 *	0.380 *	0.160	0.337	-0.445 **	0.264	-0.387 *	0.153	-0.123	1.000		
有效锰	-0.003	0.033	0.173	0.084	0.168	0.090	-0.003	-0.019	0.126	-0.539 **	1.000	
有效锌	-0.259	0.375 *	0.322	0.353 *	-0.270	0.164	-0.114	0.560 **	-0.057	0.378 *	0.156	1.000

** 二者相关性极显著 Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * 二者相关性显著 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); 下同 the same below

3 讨论

研究结果表明,阿拉善干旱荒漠区七种灌木中除了梭梭以外,其余 6 种灌木根际土壤均表现出不同程度的酸化作用。这与黄刚、Ma 和 Kopitke 等大多数学者的研究结果基本一致^[17,23,24],是由于根系呼吸作用释放 CO₂ 以及在离子的主动吸收和根尖细胞伸长过程中分泌质子和有机酸所致^[25]。也与植物根际微生物的作用有关^[26]。对于梭梭而言,则可能是由于它本身对根际阴阳离子选择吸收的结果。

钙和镁作为两种主要的中量元素,却表现出不同的变化趋势。7 种灌木根际全钙和交换性钙的含量均低于非根际土壤,这是由于阿拉善荒漠土壤本身钙的含量就比较高,足以满足灌木的生长需要,所以根际的富集效应,与土壤自身养分含量特征相比,不会起到主导作用,而灌木根系对钙离子的吸收利用起到了主导作用。弋良朋的研究结果也表明,灌木地下部分对钙离子的吸收量要大于镁离子^[15]。并且,采样时为 8 月份,灌木

生长比较旺盛,对养分的需求量也比较大,加之树冠的遮阴作用,返还量比较小,所以表现出根际交换性钙的含量显著低于非根际土壤。为了满足自身的吸收利用,灌木会尽可能多的活化根际土壤中结合态的钙,因此根际全钙含量也就小于了非根际,根际全钙与交换性钙之间呈极显著正相关性。这与以往大多数研究结果不同,但是郗金标对盐生植物土壤盐分的研究也有类似结果^[19]。

表 5 非根际各养分性状间的相关性分析

Table 5 Correlation coefficients between bulk soil nutrients

项目 Item	全钙 Total Ca	全镁 Total Mg	全铜 Total Cu	全铁 Total Fe	全锰 Total Mn	全锌 Total Zn	有效钙 Available Ca	有效镁 Available Mg	有效铜 Available Cu	有效铁 Available Fe	有效锰 Available Mn	有效锌 Available Zn
全钙	1.000											
全镁	0.186	1.000										
全铜	-0.316 *	0.524 **	1.000									
全铁	-0.214	0.686 **	0.820 **	1.000								
全锰	0.275	-0.134	-0.362 *	-0.587 **	1.000							
全锌	-0.092	0.700 **	0.748 **	0.809 **	-0.296	1.000						
有效钙	0.663 **	0.325 *	-0.134	-0.088	0.530 **	0.108	1.000					
有效镁	0.037	0.405 **	0.214	0.136	0.158	0.248	0.351 *	1.000				
有效铜	-0.056	0.454 **	0.317 *	0.511 **	-0.178	0.589 **	0.329 *	0.259	1.000			
有效铁	-0.523 **	0.334 *	0.678 **	0.727 **	-0.661 **	0.530 **	-0.569 **	-0.042	0.215	1.000		
有效锰	0.336 *	-0.051	0.009	-0.182	0.213	0.091	0.390 *	0.357 *	0.189	-0.342 *	1.000	
有效锌	-0.375 *	0.301	0.549 **	0.460 **	-0.358 *	0.372 *	-0.305	0.454 **	0.206	0.614 **	0.220	1.000

全镁和交换性镁在灌木根际总体上表现出不同程度的富集效应,白刺根际全镁的富集率达到了 43.04%。沙木蓼和驼绒藜根际全镁含量均低于非根际,这与它们本身的生长状况和选择性吸收有关,沙木蓼和驼绒藜的冠幅要明显小于其它科灌木(表 1),而冠幅的大小会对养分的截留程度产生直接的作用^[27]。同属于藜科的梭梭,根际全镁含量却表现出 0.10% 的富集趋势,这也与它自身的生长状况和选择性吸收有关,因为它的冠幅和高度均大于沙木蓼和驼绒藜(表 1)。

铁、锰、锌 3 种微量元素,根际全量含量总体上小于非根际,但是根际有效含量均大于非根际土壤,表现出明显的富集效应,一些灌木还达到了显著水平,结合 pH 值以及已有的研究结论来看,这是植物通过向根际分泌有机酸再加上根际微生物作用的结果,植物会尽可能多的活化溶解根际土壤中结合态的铁、锰、锌,进而保证自己的吸收利用^[28-30]。由于灌木常年对铁、锰、锌的吸收利用,长期以来就造成了根际全量含量小于非根际,这个结论还需要结合灌木体内养分的吸收状况做进一步的验证。

全铜和有效铜在沙木蓼的根际有富集的趋势,其余灌木根际全铜和有效铜的含量总体上均小于非根际,我们认为有两种不同的原因:一是灌木需要从根际吸收有效态的铜满足自己的生长需求,干旱地区碱性土壤中可供利用的铜又比较少,造成根际有效铜含量下降。二是由于铜元素过量会对植物产生毒害作用,在长期的适应过程中,植物会通过螯合、络合、沉淀等作用降低根际土壤中重金属元素的有效性,减少对铜元素的吸收利用,这种体外建立起来的抗性作用比在体内的抗性更为积极主动^[31]。Merckx 的试验结果也表明,根系分泌物的络合作用会影响植物根际 ⁵⁷Co 的形态,制约了钴元素的毒性^[32]。因此,根际有效铜的含量低于非根际土壤。在灌木长期抵抗铜离子的作用下,铜离子由根际土壤迁移至非根际土壤,便造成了根际全铜含量显著低于非根际。此外,Lexmond 和 Chaignon 的研究结果表明 pH 的升高,有效铜含量也会升高^[33,34],本研究中梭梭根际 pH 高于非根际,而有效铜在梭梭根际也表现出富集的趋势。

Cornu 的研究结果表明:西红柿根际铜的含量与植株体内铁的含量、状态有关^[35]。此外,大量元素的吸收利用也会对微量元素的含量产生影响。Kopittke 研究发现当给植物供给不同形态的氮源时,会引起植物根际 pH 的变化,进而影响根际有效锰的含量^[24],陈永亮也发现,当给红松林木加以不同浓度的氮源时,会对根际

有效 Fe、Mn、Cu、Zn 的吸收产生影响^[36]。Li 的研究发现不同形态的磷源也会对根际中、微量元素的吸收利用产生影响^[37]。本研究相关性分析结果表明:根际及非根际各土壤养分,相互影响,协同作用,例如根际有效铜与根际全铜呈极显著负相关,但是与根际全钙和根际交换性钙却呈极显著正相关。

不同灌木对中、微量元素的根际效应,受植物根系的生长特征、冠幅的大小、根际 pH 值的大小、根际氧化还原电位的高低、根际分泌物的组成、根际微生物的种类、根际有机质的含量等因素的影响;可能是以其中一种因素为主,也可能是几种因素共同作用,是灌木长期适应恶劣环境的结果,此外还与植物本身所处的生长发育阶段及其基因型有关^[38~42],所以造成了根际效应的复杂多样性。对于不同的灌木而言,根际土壤中离子的变化主要是由于根系对离子的选择吸收和吸收速率不同所造成的。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^[15]。

本文对荒漠旱生灌木根际微量元素的研究作了一些尝试性的探讨,有待今后从时空两方面入手,在灌木生长发育的不同阶段,根际的不同位置,结合灌木本身的形态特征、根际的水分、养分、有机酸种类、微生物群体、灌木地上和地下部分对养分的吸收利用状况,做进一步的研究,也可以借助分子生物学的方法,以其更好的准确的解释根际在荒漠灌木的土壤-根际-植物系统中所起的作用。

4 结论

4.1 7 种灌木根际全钙和交换性钙含量均低于非根际。除沙木蓼外,全镁和交换性镁在灌木根际表现出不同程度的富集效应,白刺对全镁有较强的富集能力,而梭梭对交换性镁有较强的富集能力。

4.2 7 种灌木根际全铁、全锰、全锌含量总体上小于非根际,但是根际有效铁、有效锰、有效锌含量均大于非根际土壤,其中沙木蓼的富集率最高。

4.3 全铜和有效铜在沙木蓼的根际有富集的趋势,有效铜在梭梭根际也有所富集,其余灌木根际全铜和有效铜的含量均小于非根际土壤。

4.4 根际及非根际各土壤养分,相互影响,协同利用。

References:

- [1] Ma B, Zhou Z Y, Zhang C P, Li X R. The character of phosphorus concentrations in rhizosphere soil of super-xerophytic shrubs. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3): 106–110.
- [2] Kuffner M, Puschenreiter M, Wieshammer G, Gorfer M. Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows. *Plant and Soil*, 2008, 304: 35–44.
- [3] Chaudhry Q, Zandstra B, Satish M, Joner G. Utilising the synergy between plants and rhizosphere micro-organisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2005, 12(1): 34–48.
- [4] Frey B, Pesaro M, Rudt A, Widmer F. Resilience of the rhizosphere *Pseudomonas* and ammonia-oxidizing bacterial populations during phyto-extraction of heavy metal polluted soil with poplar. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(6): 1433–1449.
- [5] Azcon-Aguilera C, Palenzuela J, Roldan A, Bautista S, Vallejo R, Barea J M. Analysis of the mycorrhizal potential in the rhizosphere of representative plant species from desertification-threatened Mediterranean shrublands. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22: 29–37.
- [6] Rolda A, Carrasco L, Caravaca F. Stability of desiccated rhizosphere soil aggregates of mycorrhizal *Juniperus oxycedrus* grown in a desertified soil amended with a composted organic residue. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2722–2730.
- [7] Caravaca F, Barea J M, Palenzuela J, Figueroa D. Establishment of shrub species in a degraded semiarid site after inoculation with native or allochthonous arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(2): 103–111.
- [8] Ouahmane L, Duponnois R, Hafidi M, Kisa M, Boumezouch A, Thioulouse J, Plenchette C. Some Mediterranean plant species (*Lavandula* spp. and *Thymus satureioides*) act as potential ‘plant nurses’ for the early growth of *Cupressus atlantica*. *Plant Ecology*, 2006, 185: 123–134.
- [9] Verhagen B W M, Glazebrook J, Zhu T, Chang H S, Vanloon L C, Pieterse C M J. The Transcriptome of Rhizobacteria-Induced Systemic Resistance in *Arabidopsis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2004, 17(8): 895–908.
- [10] Eich-Greatorex S, Strand L T. Soil Chemical properties in the vicinity of pores with and without roots. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 778–785.

- [11] Rengel Z, Marschner P. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 305—312.
- [12] Lehto N J, Davison W, Zhang H, Tych W. Analysis of Micro-Nutrient behaviour in the rhizosphere using a DGT Parameterised Dynamic Plant Uptake Model. *Plant and Soil*, 2006, 28: 227—238.
- [13] Gregory P J, Hinsinger P. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: an overview. *Plant and Soil*, 1999, 21: 1—29.
- [14] Zeng S C, Su Z Y, Chen B G, Yu Y C. A Review on the Rhizosphere Nutrition Ecology Research. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2003, 27(6): 79—83.
- [15] 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.
- [16] Su Y Z, Zhao H L, Li Y L, Cui J Y. Influencing Mechanisms of Several Shrubs on Soil Chemical Properties in Semiarid Horqin Sandy Land, China. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18(3): 251—263.
- [17] Huang G, Zhao X Y, Zhang T H, Su Y G. Ph and Nutrition properties of rhizosphere soils of three shrub species in Horqin Sandy Land. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(8): 138—142.
- [18] Garcia C, Roldan A, Hernandez T. Ability of different plant species to promote microbiological processes in semiarid soil. *Geoderma*, 2005, 124: 193—202.
- [19] Xi J B, Zhang F S, Chen Y, Mao D R, Yin C H. A preliminary study on salt contents of soil in root-canopy area of halophytes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 53—58.
- [20] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean root soil interface. *Soil Science Society of American Journal*, 1969, 33: 905—908.
- [21] Riley D, Barber S A. Salt accumulation at the soybean root soil interface. *Soil Science Society of American Journal*, 1970, 34: 154—155.
- [22] Hirobe M, Ohte N, Karasawa N, Zhang G, Wang L. Plant species effect on the spatial patterns of soil properties in the Mu-us desert ecosystem, Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, 2001, 234: 195—205.
- [23] Ma B, Zhou Z Y, Zhang C P, Zhang G, Hu Y J. Inorganic phosphorus fractions in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 55—61.
- [24] Kopittke P M, Menzies N W. Effect of Mn deficiency and legume inoculation on rhizosphere pH in highly alkaline soils. *Plant and Soil*, 2004, 262: 13—21.
- [25] Hinsinger P, Plassard C, Tang C, Jaillard B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil*, 2003, 248: 43—59.
- [26] Phillipd A, Foxt C, Kingm D. Microbial products trigger amino acid exudation from plant roots. *Plant Physiol*, 2004, 136: 2887—2894.
- [27] Scholes R J, Archer S A. Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 517—544.
- [28] Sun Q, Wang X R, Ding S M. Rhizosphere effects in metal absorption by hyper accumulators and its research advances. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 30—36.
- [29] Xu W H, Huang H, Wang A H, Xiong Z T. Advance in studies on activation of heavy metal by root exudates and mechanism. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1): 184—189.
- [30] Zhang X Z, Li T X, Wang Y D. Relationship between Growth Environment and Root Exudates of Plants: A Review. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 785—789.
- [31] Shi G R. Ecological effects of plant root exudates. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 97—101.
- [32] Merckx R, Van-Ginkel J H, Sinnaeve J. Plant induced changes in the rhizosphere of maize and wheat II. Complexation of cobalt, zinc and manganese in the rhizosphere of maize and wheat. *Plant Soil*, 1986, 96: 95.
- [33] Lexmond T M, Vorm P D J. The effect of pH on copper toxicity to hydroponically grown maize. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1981, 29, 217—238.
- [34] Chaignon V, Bedin F, Hinsinger P. Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and alcalcareous soil. *Plant and Soil*, 2002, 243: 219—228.
- [35] Cornu J Y, Staunton S, Hinsinger P. Copper concentration in plants and in the rhizosphere as influenced by the iron status of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Plant Soil*, 2007, 292: 63—67.
- [36] Chen Y L, Han S J, Zhou Y M, Cheng G L. The pH change in rhizosphere of *Pinus koraiensis* seedlings as affected by different nitrogen sources and its effect on phosphorus availability. *Journal of Forestry Research*, 2002, 01: 247—249.
- [37] Li L, Tang C, Rengel Z, Zhang F S. Calcium, magnesium and microelement uptake as affected by phosphorus sources and interspecific root interactions between wheat and chickpea. *Plant and Soil*, 2004, 261: 29—37.

- [38] Hinsinger P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advances in Agronomy*, 1998, 24: 225 — 265.
- [39] Hinsinger P. Bioavailability of trace elements as related to root-induced chemical changes in the rhizosphere. In: Gobran G R ed. *Trace Elements in the Rhizosphere*. Florida: CRC Press. 2000: 25 — 41.
- [40] Hinsinger P. Bio-availability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 2001, 237: 173 — 195.
- [41] McLaughlin M J, Smolders E, Merckx R. Soil-root interface: physico-chemical processes. In: McLaughlin M J ed. *Soil Chemistry and Ecosystem Health*. Madison: Soil Science Society of America Press, 1998. 233 — 277.
- [42] Rengel Z. Genotypic differences in micro-nutrient use efficiency in crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32: 1163 — 1186.

参考文献:

- [1] 马斌, 周志宇, 张彩萍, 李雪瑞. 超旱生灌木根际土壤磷的含量特征. *草业学报*, 2005, 14(3): 106 ~ 110.
- [14] 曾曙才, 苏志尧, 陈北光, 俞元春. 植物根际营养研究进展. *南京林业大学学报*, 2003, 27(6): 79 ~ 83.
- [15] 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.
- [17] 黄刚, 赵学勇, 张铜会, 苏延桂. 科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况. *林业科学*, 2007, 43(8): 138 ~ 142.
- [19] 郗金标, 张福锁, 陈阳, 毛达如, 尹传华. 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 53 ~ 58.
- [28] 孙琴, 王晓蓉, 丁士明. 超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 30 ~ 36.
- [29] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 熊治廷, 王正银. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展. *生态环境*, 2006, 15(1): 184 ~ 189.
- [30] 张锡洲, 李廷轩, 王永东. 植物生长环境与根系分泌物的关系. *土壤通报*, 2007, 38(4): 785 ~ 789.
- [31] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 97 ~ 101.