

干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征

薛梓瑜, 周志宇*, 詹媛媛, 任 伟

(兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020)

摘要:以阿拉善干旱荒漠草地的 7 种旱生灌木白刺(*Nitraria tangutorum*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、沙木蓼(*Atraphaxis bractata*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和驼绒藜(*Ceratoides lateens*)根际和非根际土壤为试验对象,对其根际与非根际土壤全磷、有效磷及不同磷的化学形态特征进行了分析研究。结果表明,7 种灌木根际土壤有效磷含量高于非根际土壤;沙木蓼根际全磷含量、DHCl-Pi、HHCl-Pi 含量高于非根际土壤,其余 6 种灌木根际全磷含量、DHCl-Pi、HHCl-Pi 含量低于非根际土壤。另外,除梭梭外,其他 6 种灌木根际土壤 H₂O-P 含量均低于非根际土壤;驼绒藜根际 NaHCO₃-Pi、DHCl-Pi 和 HHCl-Pi 均显著低于非根际土壤。除沙冬青外,其余 6 种灌木根际 NaOH-Po 均低于非根际土壤,7 种灌木根际 HHCl-Po 含量均低于非根际土壤。对根际、非根际土壤全磷、有效磷含量和 pH 进行相关分析,根际、非根际土壤有效磷和全磷含量相关性不显著,而根际、非根际土壤有效磷和 pH 相关性显著。

关键词:干旱荒漠;灌木;根际土壤;有效磷

Changing characteristics of phosphorus in the rhizosphere soil of the xeromorphic shrubs in arid deserts

XUE Ziyu, ZHOU Zhiyu*, ZHAN Yuanyuan, REN Wei

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

Abstract: Seven native xeromorphic shrub species inhabiting in the Alashan desert, including *Nitraria tangutorum*, *Zygophyllum xanthoxylum*, *Reaumuria soongorica*, *Ammopiptanthus mongolicus*, *Atraphaxis bractata*, *Haloxylon ammodendron* and *Ceratoides lateens*, are used to investigate and compare differences in contents of total P, available P, and P fractions between bulk and rhizosphere soils. It is found that there is a higher available P concentration in the rhizosphere soil than in the bulk soil for all seven shrubs, but concentrations of total P, DHCl-Pi and HHCl-Pi are lower in the rhizosphere soil than in the bulk soil in all shrubs except *A. bractata*. Our results also showed that the H₂O-P concentration is lower in the rhizosphere soil than in the bulk soil in all shrubs except *H. ammodendron*, whereas concentrations of NaHCO₃-Pi, DHCl-Pi and HHCl-Pi are lower in the rhizosphere soil than in the bulk soil in *C. lateens* and that the NaOH-Po concentration is lower in the rhizosphere soil than in the bulk soil in all shrubs except *A. mongolicus*, as well as the HHCl-Po concentration is lower in the rhizosphere soil than in the bulk soil in all shrubs. Regression analyses indicated a significant relationship between available P concentration and pH, but no significant relationships are found between total P concentration and pH in both the rhizosphere and bulk soils.

Key Words: arid deserts; shrubs; rhizosphere; available phosphorus

根际是植物根周围受植物、土壤、微生物共同影响的特殊生态微域,具有特殊的物理、化学及生物学特性。当前国际上对植物根际的研究已经成为土壤学、植物学、微生物学、生态学、污染生态学、生理生态学、微生态

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目资助(973 项目)(2007CB108903);国家自然科学基金资助项目(30800801)

收稿日期:2008-10-18; **修订日期:**2009-05-22

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

学等关注的热点,在养分利用效率提高、污染治理、生态工程 and 环境保护有重要作用。大量研究表明,根际微域 K、Ca、Mg^[1-2],有机 C、pH、Al^[2] 含量与非根际有较大区别。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的利用及适应非常重要。由于磷在土壤中易被固定,移动性较差,导致对植物生长有效的磷含量较低,磷经常成为植物生长的主要限制因子^[3]。因此,研究植物对土壤磷的活化,提高磷的利用效率已成为国内外研究的热点^[4-5]。在低磷土壤中生长的植物通过根系分泌有机酸^[6],改变根系形态结构形成簇根^[7],改变细胞膜运输磷酸盐的动力学^[8]或通过菌根^[9]等方式提高或改善对磷的吸收。

目前,国内大量的根际研究主要集中在农业和林业方面,而对于干旱荒漠区旱生灌木植物根际营养特征研究也有少量报道。苏永中等^[10]在研究灌木对土壤肥力影响中发现,根际土壤全 N 和全 C 分别比非根际土壤高出 54% 和 76%,而根际土壤 pH 要比非根际低 0.19 个单位;詹媛媛等^[11]研究表明,相对于非根际土壤,根际土壤全氮、铵态氮、硝态氮分别平均高出 24.9%、24.5%、65.1%;马斌等^[12]采用改进的蒋柏藩、顾益初对石灰性土壤无机磷的分级方法分析灌木根际无机磷养分表明,所有的无机磷组分都有可能被植物利用,包括被认为有效性极低的 Ca₁₀-P 和 O-P 也可能在根际出现亏缺。而蒋柏藩、顾益初对石灰性土壤无机磷的分级方法,主要集中在研究植物可直接利用的无机磷这一形态上,无法顾及有机磷,本研究采用 Sui 等人修正后的 Tiessen 磷素分级方法,该方法基本克服了以往分级方法无法兼顾无机磷和有机磷的缺点。

在干旱半干旱地区,采用适当的磷素分级方法来研究土壤中磷素的形态,对于揭示土壤磷素状况具有重要的意义。过去人们对于土壤磷的形态研究方法主要采用 Olsen-P 的方法测定中性或碱性土壤中有效态无机磷,采用 Chang 和 Jackson 的无机磷分级方法以及众多研究者对该方法的改进和我国蒋柏藩、顾益初对石灰性土壤无机磷的分级方法,主要集中在研究植物可直接利用的无机磷这一形态上,20 世纪 80 年代初, Hedley 采用连续浸提的方法对磷进行了分级,该方法基本克服了以往分级方法无法兼顾无机磷和有机磷的缺点。最近十几年, Tiessen^[13]、Sui^[14] 以及 Guppy^[15] 等人对该方法又进行了修正,并根据各组分相对稳定性将浸提出的有机磷分为活性、潜在活性和较稳定形态。本文参照 Sui 等人修正后的 Tiessen 的磷素分级方法,研究不同灌木植物对土壤磷素的聚积以及不同磷素形态在根际微域环境中的特征,对于揭示灌木养分利用,以及为干旱荒漠区脆弱生态系统的保护和恢复管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区自然状况

研究区位于阿拉善左旗巴彦浩特南部李井滩。试验区海拔 1370m,年均温 8℃ 左右,极端低温 -32.2℃, ≥10℃ 积温一般为 3200—3600℃,年均降水量 100—150mm,主要集中在 7, 8, 9 三个月,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。

1.2 取样方法

在试验区选择以不同灌木为主的 7 个样地,样点范围为 100m × 100m,在样地内选取 7 株中等大小的成年样株供采样分析,取样灌丛的形态特征和分布见表 1。各样地分别以梭梭 (*H. ammodendron*)、霸王 (*Z. xanthoxylum*)、红砂 (*R. songorica*)、白刺 (*N. tangutorum*)、驼绒藜 (*C. lateans*)、沙冬青 (*A. mongolicus*)、沙木蓼 (*A. bracteata*) 为主,分属 5 个科 7 个属共 7 种旱生灌木。先用铁锹铲去落叶层,然后用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,沿侧根找到须根部分,剪下分枝,轻轻抖动后落下的土壤为非根际土壤,仍粘在根上的为根际土壤,用毛刷收集到土壤袋保存,供分析用^[5,10-11,16]。

1.3 土壤样品分析

土壤样品风干处理后,过 0.5mm 筛,进行如下项目测定:(1)全磷, HNO₃-HF 微波消解-钼锑抗比色法测定。(2)有效磷,用 Olsen 法, NaHCO₃ (pH 8.5) 浸提,钼锑抗比色法测定。(3)另取部分样品过 0.15mm 筛,磷

素分级方法采用 Sui 等人修正后的 Tiessen 磷素分级方法,测定流程见图 1。(4)pH 测定采用电位法(水:土 = 2.5:1)。

表 1 7 种灌木形态特征及分布
Table 1 Distribution and morphological traits of seven shrubs

项目 Item	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 Luxuriance
红砂 <i>R. soongorica</i>	柽柳科 Tamaricaceae	38—41	139—157	61—65	旺盛 Luxuriance
沙冬青 <i>A. mongolicus</i>	豆科 Leguminosae	106—110	242—250	13—15	旺盛 Luxuriance
沙木蓼 <i>A. bracteata</i>	蓼科 Polygonaceae	33—38	66—76	14—16	旺盛 Luxuriance
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	藜科 Chenopodiaceae	76—82	85—100	8—9	旺盛 Luxuriance
驼绒藜 <i>C. lateens</i>	藜科 Chenopodiaceae	50—53	57—63	24—29	旺盛 Luxuriance

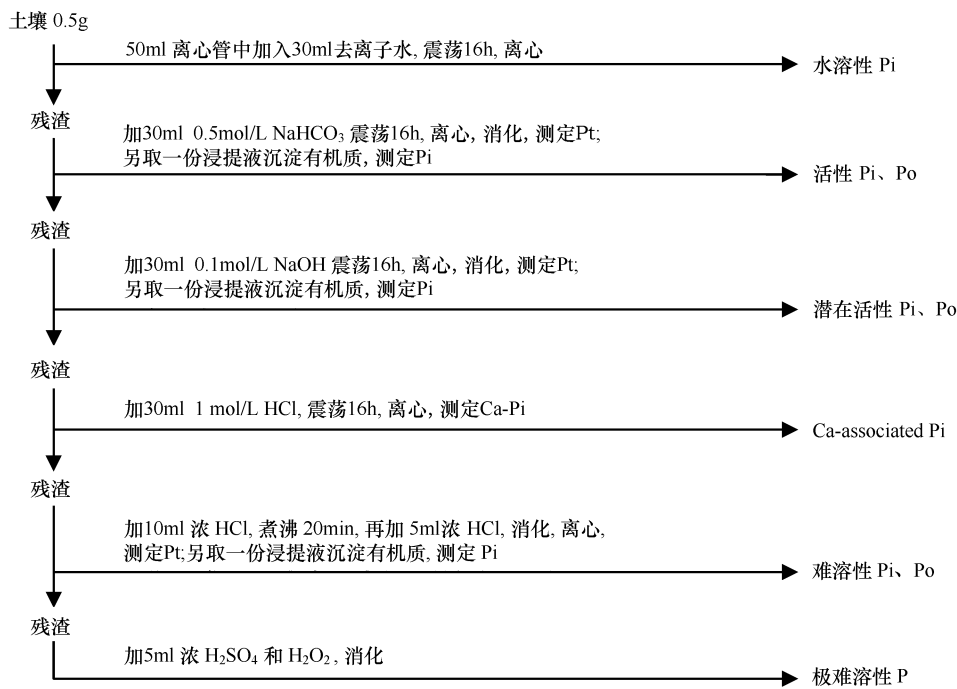


图 1 土壤磷的分级流程图
Fig.1 Phosphorus fractionation chart

1.4 数据处理

数据均使用 SPSS14.0 进行统计分析,不同灌木物种根际土壤与非根际土壤之间各养分的差异采用配对 T 检验分析比较。采用相关性分析确定土壤全磷与有效磷,根际 pH 值与根际有效磷之间关系。采用富集率表示根际土壤对全磷和有效磷的富集程度:

富集率 = [(根际 P 含量 - 非根际 P 含量) / 非根际 P 含量] × 100%

2 结果分析

2.1 全磷与有效磷含量特征

从表 2 中可见,7 种灌木中,除沙木蓼根际全磷含量高于非根际外,其余 6 种灌木根际全磷含量均低于非根际,但除梭梭非根际全磷含量显著高于根际土壤(P<0.05)外,红砂、沙冬青、白刺、驼绒藜和霸王根际与非根际土壤全磷含量差异性不显著(P>0.05)。相对于土壤中的全磷含量,土壤中的有效磷含量极低(<

10mg/kg)。由表 3 可知,7 种灌木根际土壤有效磷含量均高于非根际土壤,表现出在根际的富集。但除霸王、梭梭根际土壤有效磷含量显著高于非根际土壤($P < 0.05$)外,其他灌木根际与非根际土壤有效磷含量差异性不显著($P > 0.05$)。根际土壤有效磷含量大小依次为:红砂 > 驼绒藜 > 霸王 > 白刺 > 沙冬青 > 梭梭 > 沙木蓼。

表 2 根际与非根际土壤全磷含量特征

Table 2 The characteristics of total P in bulk and rhizosphere soils

测试项目 Test item	沙木蓼 <i>A. bracteata</i>	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	红砂 <i>R. soongorica</i>	沙冬青 <i>A. mongolicus</i>	白刺 <i>N. tangutorum</i>	驼绒藜 <i>C. lateens</i>	霸王 <i>Z. xanthoxylum</i>
根际全磷含量/% Total phosphorus concentrations in rhizosphere soil/%	0.021 ± 0.004a	0.021 ± 0.001a	0.015 ± 0.001a	0.014 ± 0.002a	0.011 ± 0.001a	0.022 ± 0.001a	0.021 ± 0.001a
非根际全磷含量/% Total phosphorus concentrations in bulk soil/%	0.019 ± 0.003a	0.023 ± 0.001b	0.017 ± 0.001a	0.016 ± 0.004a	0.014 ± 0.002a	0.024 ± 0.001a	0.022 ± 0.001a

平均值 ± 标准差;同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同

表 3 不同灌木根际与非根际土壤有效磷含量特征

Table 3 The characteristics of available P in bulk and rhizosphere soils

测试项目 Test item	沙木蓼 <i>A. bracteata</i>	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	红砂 <i>R. soongorica</i>	沙冬青 <i>A. mongolicus</i>	白刺 <i>N. tangutorum</i>	驼绒藜 <i>C. lateens</i>	霸王 <i>Z. xanthoxylum</i>
根际有效磷含量 Available phosphorus concentrations in rhizosphere soil/(mg/kg)	2.57 ± 0.45a	3.72 ± 0.40a	6.53 ± 0.44a	3.78 ± 0.43a	5.76 ± 0.84a	6.46 ± 0.51a	6.12 ± 0.23a
非根际有效磷含量 Available phosphorus concentrations in rhizosphere soil/(mg/kg)	2.03 ± 0.26a	2.77 ± 0.09b	6.28 ± 0.28a	3.43 ± 0.58a	4.67 ± 0.19a	6.22 ± 0.63a	4.50 ± 0.50b
富集率 Enrichment rate/%	26.6	34.2	3.98	10.2	23.3	3.85	36.0

从图 2 中可以看出,除梭梭根际土壤 pH 高于非根际土壤外,其余 6 种灌木根际土壤 pH 均低于非根际土壤,不同灌木根际酸化程度也不相同,pH 降低幅度在 0.04—0.29 之间,其大小顺序为:红砂 > 霸王 > 驼绒藜 > 沙木蓼 > 沙冬青 > 白刺。对土壤有效磷与土壤 pH 进行相关性分析(表 4)结果看出,在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时,非根际有效磷与非根际 pH 呈显著负相关,在显著水平 $\alpha = 0.01$ 时,根际有效磷与根际 pH 极显著负相关。

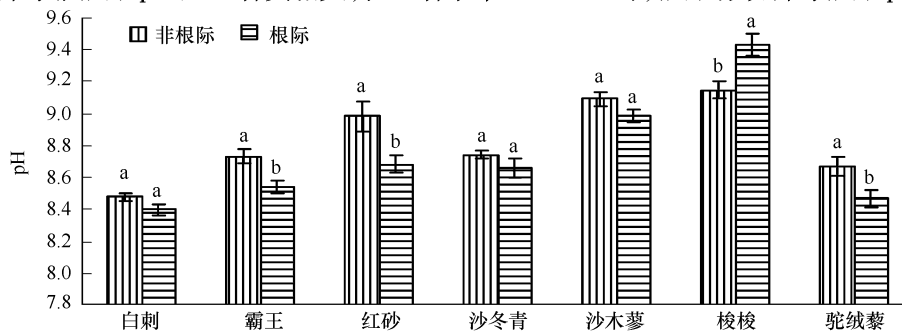


图 2 根际与非根际土壤 pH

Fig. 2 pH in bulk and rhizosphere soils

白刺 *N. tangutorum*, 霸王 *Z. xanthoxylum*, 红砂 *R. soongorica*, 沙冬青 *A. mongolicus*, 沙木蓼 *A. bracteata*, 梭梭 *H. ammodendron*, 驼绒藜 *C. lateens*

表 4 全磷、有效磷和 pH 的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among total P, available P and pH

测试项目 Test item	非根际 pH Bulk soil pH	根际 pH Rhizosphere soil pH	非根际有效磷 Available phosphorus in bulk soil	根际有效磷 Available phosphorus in rhizosphere soil	非根际全磷 Total phosphorus in bulk soil
根际 pH Rhizosphere soil	0.712(**)				
pH					
非根际有效磷 Available phosphorus in bulk soil	-0.0388(*)	-0.0584(**)			
根际有效磷 Available phosphorus in rhizosphere soil	-0.0452(**)	-0.0648(**)	0.719(**)		
非根际全磷 Total phosphorus in bulk soil	-0.0029	0.047	0.008	0.273	
根际全磷 Total phosphorus in rhizosphere soil	0.222	0.173	-0.0152	-0.0113	0.486(**)

*, ** 分别表示显著差异水平为 0.05, 0.01, 下同

2.3 磷分组含量特征

2.3.1 无机磷含量特征

7 种灌木根际与非根际土壤无机磷含量见表 5。土壤磷分组结果表明,除梭梭外,其他 6 种灌木根际 H_2O-P 含量均低于非根际,根际 H_2O-P 含量大小依次为:驼绒藜 > 白刺 > 沙冬青 > 梭梭 > 霸王 > 红砂 > 沙木蓼;驼绒藜根际 $NaHCO_3-Pi$, $DHCl-Pi$ 和 $HHCl-Pi$ 均显著低于非根际土壤;除霸王外,而其余 6 种灌木 $NaOH-Pi$ 均在根际出现富集,其中沙冬青,红砂差异性显著; $DHCl-Pi$, $HHCl-Pi$ 是难溶性磷素形态,有效性较低,除沙木蓼根际 $DHCl-Pi$, $HHCl-Pi$ 含量高于非根际外,其余 6 种灌木根际 $DHCl-Pi$, $HHCl-Pi$ 含量均低于非根际,其中 $DHCl-Pi$ 在梭梭根际降低幅度最大,其他依次为:驼绒藜 > 白刺 > 霸王 > 红砂 > 沙冬青,而 $HHCl-Pi$ 在驼绒藜根际降低幅度最大,其他依次为:沙冬青 > 红砂 > 霸王 > 梭梭 > 白刺。

2.3.2 有机磷含量特征

7 种灌木根际与非根际土壤有机磷含量见表 5。除沙冬青外,其余 6 种灌木根际 $NaOH-Po$ 均低于非根际土壤, $NaOH-Po$ 在根际的含量大小依次为:红砂 > 沙冬青 > 梭梭 > 霸王 > 白刺 > 驼绒藜 > 沙木蓼;7 种灌木根际 $HHCl-Po$ 含量均低于非根际土壤, $HHCl-Po$ 在根际的含量大小依次为:沙冬青 > 红砂 > 梭梭 > 沙木蓼 > 驼绒藜 > 霸王 > 白刺。根际 $NaOH-Po$ 和 $HHCl-Po$ 含量低于非根际,说明潜在的、可以转化的有机磷数量减少。

2.4 土壤有效磷和各磷组分含量之间的关系

对根际土壤有效磷和各磷组分含量进行相关分析(表 6)。由表 6 可以看出,在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时,根际土壤有效磷与 H_2O-P , $NaHCO_3-Pi$, $NaOH-Pi$ 含量显著相关,而与其它磷组分没有相关性。对非根际土壤有效磷和各磷组分含量进行相关分析表明(表 7),在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时,非根际土壤有效磷与 $NaHCO_3-Po$, $DHCl-Po$ 含量显著相关;在显著水平 $\alpha = 0.01$ 时,非根际土壤有效磷与 H_2O-P , $NaHCO_3-Pi$, $NaOH-Pi$, $NaOH-Po$ 含量极显著相关。

3 分析与讨论

本项研究的结果表明,7 种灌木除沙木蓼根际全磷高于非根际外,其余 6 种灌木根际均低于非根际。在其他一些报道中,根际与非根际全磷含量差异多不显著^[10,17-18]。由于根系分泌有机物、根系脱落物及根系的更新,旱生灌木根际土壤有机质含量相对较高,虽然这些有机物质并不会增加土壤磷含量,但却会影响磷在土壤中的移动性^[19]。根际土壤全磷低于非根际土壤,说明在低磷土壤条件下,根际微域发生的一系列变化对土壤全磷养分的活化,提高土壤磷的有效性具有一定作用。

表 5 根际与非根际土壤磷分组含量特征

Table 5 The characteristics of P fractionations in bulk and rhizosphere soils

灌木种类 Shrub species		H ₂ O-P	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	DHCl-Pi ^①	HHCl-Pi ^②	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Po	HHCl-Po	Residual P
白刺 <i>N. tangutorum</i>	R	8.54a	2.92a	6.71a	46.34a	31.08a	13.71a	5.44a	8.52a	60.07a
	B	9.25a	3.66a	6.03a	59.41a	31.14a	10.32a	5.64a	8.59a	48.93a
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	R	5.34a	3.81a	4.24a	192.18a	19.87a	5.30a	6.44a	12.28a	86.356a
	B	4.46a	4.35a	3.79a	243.70b	21.72a	6.31a	10.22a	12.58a	76.86a
沙木蓼 <i>A. bracteata</i>	R	3.69a	1.62a	2.80a	169.31a	17.51a	8.41a	2.30a	11.89a	54.93a
	B	3.79a	1.87a	2.63a	138.17a	12.83a	5.99a	3.54a	12.08a	33.93a
驼绒藜 <i>C. lateens</i>	R	8.64a	5.39a	6.39a	133.64a	36.42a	13.84a	5.39a	9.34a	76.19a
	B	16.69b	6.74b	6.39a	163.86b	55.80b	10.43a	15.54b	21.84b	62.42a
沙冬青 <i>A. mongolicus</i>	R	6.65a	2.56a	5.01a	59.50a	31.63a	8.02a	8.23a	15.33a	104.20a
	B	9.04a	2.06a	4.25b	61.45a	37.68a	9.62a	3.73a	15.33a	88.97a
红砂 <i>R. soongorica</i>	R	3.95a	5.66a	8.15a	116.25a	30.25a	9.01a	16.42a	14.30a	89.71a
	B	4.27a	5.18a	6.83b	120.21a	34.85b	10.35a	21.76a	19.68b	75.07a
霸王 <i>Z. xanthoxylum</i>	R	4.73a	6.21a	7.60a	91.78a	30.29a	7.41a	5.50a	9.25a	36.80a
	B	4.74a	5.52a	8.29b	103.10a	33.91a	8.31a	5.50a	12.61a	26.50a

① DHCl 为 1.0 mol/L HCl, 下同; ② HHCl 为热浓 HCl, 下同

表 6 根际土壤有效磷与磷组分相关系数

Table 6 Correlation coefficients between available P and P fractionations in rhizosphere soils

	Olsen-P	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	DHCl-Pi	HHCl-Pi	Residual P	NaCO ₃ -Po	NaOH-Po
H ₂ O-P	0.279(*)								
NaHCO ₃ -Pi	0.867(**)	0.186							
NaOH-Pi	0.565(**)	0.133	0.556(**)						
DHCl-Pi	-0.0143	-0.0046	-0.0017	-0.0349(*)					
HHCl-Pi	0.203	0.450(**)	0.130	0.501(**)	-0.0201				
Residual P	-0.0049	-0.0086	-0.0047	-0.0075	-0.0116	0.124			
NaHCO ₃ -Po	-0.0049	0.304(*)	-0.0139	0.079	-0.0207	0.380(**)	0.109		
NaOH-Po	0.100	-0.0149	0.280(*)	-0.0498(**)	-0.0155	0.256	0.255	-0.0108	
DHCl-Po	0.141	-0.0168	-0.0204	-0.0024	0.032	-0.0007	0.287(*)	-0.0168	0.217

表 7 非根际土壤有效磷与磷组分相关系数

Table 7 Correlation coefficients between available P and P fractionations in bulk soils

	Olsen-P	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	DHCl-Pi	HHCl-Pi	Residual P	NaCO ₃ -Po	NaOH-Po
H ₂ O-P	0.486(**)								
NaHCO ₃ -Pi	0.724(**)	0.506(**)							
NaOH-Pi	0.622(**)	0.130	0.663(*)						
DHCl-Pi	-0.0033	0.059	0.209	-0.0295(*)					
HHCl-Pi	0.247	0.355(*)	0.251	0.117	0.107				
Residual P	0.167	0.224	0.071	-0.0223	0.116	-0.045			
NaHCO ₃ -Po	0.315(*)	-0.0025	0.132	0.361(**)	-0.0165	0.119	0.198		
NaOH-Po	0.465(**)	0.132	0.393(**)	-0.0376(**)	-0.0109	0.028	0.263(*)	0.715(**)	
DHCl-Po	0.286(*)	351(*)	0.274(*)	0.165	0.138	0.955(**)	-0.0022	0.208	0.138

土壤中磷的移动能力很低, 由于植物的吸收, 根际土壤有效磷含量通常都出现亏缺^[3]。但是根际微域是一个十分复杂的环境, 植物的吸收不一定主导根际养分变化。有效磷在根际的富集和活化受很多因素影响, 如根系分泌物、根际磷酸酶、根际微生物的活动、菌根等因素的变化, 都可能会导致磷有效性的提高。许多研究表明, 根际土壤有效磷含量较非根际土壤高^[5,16,20-21], 这与所得的试验结果一致, 灌木根际有效磷含量

均高于非根际,表明有效磷在根际出现一定的富集现象,这可能是由于在无机磷以钙磷为主的土壤中,根际的酸化尤其是根系分泌的 H^+ 能显著的增加无机磷的生物有效性。对根际和非根际全磷和有效磷含量进行相关分析表明(表 4),在干旱荒漠区根际和非根际土壤有效磷和全磷含量相关性均不显著。表明在干旱地区,土壤有效磷的含量受全磷含量影响较小。这是因为虽然在较长时间尺度上,磷的有效性受地球化学变化过程的影响^[19],而在短时期内,植物根系活动改变根际的 pH 及其他土壤性质,以及植物对磷的吸收,都会影响全磷和有效磷的关系。

根际土壤 pH 的变化对土壤磷有重要的意义,尤其是在碱性土壤中,根际的酸化可以显著增加土壤磷的有效性^[3]。一般认为,吸收阴阳离子不平衡是导致 pH 变化的主要原因^[22]。此外,植物根际通常会因为根系和微生物的呼吸作用释放出 CO_2 ,从而在土壤溶液中形成 CO_3^{2-} ,或者由于根系和根际微生物释放出有机酸和 H^+ ,从而降低土壤根际 pH^[23]。从图 2 中可以看出,除梭梭根际土壤 pH 显著高于非根际土壤外($P < 0.05$),其余 6 种灌木根际土壤 pH 均低于非根际土壤,其中霸王、红砂、驼绒藜差异性显著($P < 0.05$)。许多研究表明,不同形态的氮源(NO_3^- 或 NH_4^+)对根际 pH 有不同影响。当植物以铵态氮为主要氮源时,由于吸收阳离子占优势,为维持电荷平衡,根系分泌 H^+ 多于 OH^- 或 HCO_3^- ,导致根际土壤酸化。反之,当植物以硝态氮为主要氮源时,根际土壤呈碱性。梭梭根际 pH 高于非根际,这可能是由于相比于其他 6 种灌木,梭梭吸收了较多的硝态氮,致使根系释放阴离子,从而导致梭梭根际 pH 较高^[11]。在根际与非根际,有效磷与 pH 均显著负相关,表明 pH 降低对土壤磷的有效性提高有显著作用,主要原因为 pH 的降低,使得土壤中钙磷活化,提高了钙磷的有效性^[3]。

不同灌木根际与非根际土壤各磷组分含量差异性较大。 H_2O-P 是对植物最有效的磷素形态,在研究的 7 种灌木中除梭梭外,根际 H_2O-P 均低于非根际,这与 Zoysa 等的研究结果一致^[24]。在石灰性土壤条件下,植物根际 H_2O-P 的含量低于非根际可能由于植物吸收以及微生物作用或 Fe 和 Al 氧化物对磷的吸附引起的^[24]。 $NaOH-P_i$ 是一种潜在活性的磷(吸附于 Fe, Al 表面的磷),在土壤有效磷水平下降的情况下, $NaOH-P_i$ 作为潜在性磷源可以缓慢矿化而补充土壤中的有效磷^[25]。相比于非根际土壤,根际土壤 pH 的下降导致吸附磷离子位点增加^[26],使磷离子吸附于氧化铝表面,可能是 $NaOH-P_i$ 在根际的富集原因。 $DHCl-P_i$ 和 $HHCl-P_i$ 被认为是对大多数植物都无效的磷源。但在本项研究中,除沙木蓼根际 $DHCl-P_i$, $HHCl-P_i$ 含量高于非根际外,其余 6 种灌木根际 $DHCl-P_i$, $HHCl-P_i$ 含量均低于非根际。表明在低磷营养条件下,旱生灌木可以通过对土壤难溶性磷的活化,提高磷的利用效率,而不同植物对磷的活化能力不同,这与植物的基因型有关。Zheng 等认为 $NaHCO_3-P_i$ 是植物有效的磷源^[27]。不同灌木根际与非根际之间 $NaHCO_3-P_i$ 含量变化特征可能是由于不同灌木根际活动的差异所致,同时,土壤有机质的含量也可以改变土壤磷的沉淀^[28]。

土壤有机磷的含量取决于土壤有机质数量以及有机质分解的速度。驼绒藜 $NaOH-P_o$ 和 $HHCl-P_o$, 红砂 $NaOH-P_o$ 根际含量低于非根际,说明潜在的、可以转化的有机磷数量减少。在根际微域,植物根系的生理活动能自然地释放出细胞外酶,导致根际与非根际土壤中酶的种类和数量之间的差异^[29]。Hedley 研究表明油菜在栽培 35d 后,根际土壤中磷酸酶的活性是非根际土壤的 10 倍^[29],这促进了土壤中有有机磷化合物的分解,进而被植物吸收利用。同时,根际微生物产生的植素酶、核酸酶和磷酸脂酶加速了植素、核酸、磷脂等含磷有机化合物的分解,也是 $NaOH-P_o$ 和 $HHCl-P_o$ 在根际出现亏缺的原因之一。

在根际土壤中,有效磷仅与 H_2O-P , $NaHCO_3-P_i$, $NaOH-P_i$ 有正相关性,说明在根际微域, H_2O-P , $NaHCO_3-P_i$, $NaOH-P_i$ 虽然含量较小,但在土壤磷素的有效性中起到了重要的作用。在非根际土壤中,有效磷与 H_2O-P , $NaHCO_3-P_i$, $NaOH-P_i$, $NaHCO_3-P_o$, $NaOH-P_o$ 和 $HHCl-P_o$ 显著正相关(表 7)。相比于根际土壤,非根际土壤有效磷与有机磷相关性显著。这可能是因为根际区域,植物与土壤微生物的共同作用,导致根际土壤中酶的种类和数量高于非根际土壤^[27],促进了根际有机磷化合物分解,降低了有机磷的有效性。

4 结论

(1)除沙木蓼根际全磷含量高于非根际外,其余 6 种灌木根际含量均低于非根际。7 种灌木根际有效磷

含量均高于非根际土壤。

(2) 7 种灌木中,除梭梭根际 pH 高于非根际外,其余 6 种灌木根际 pH 均低于非根际。

(3) 土壤磷分组结果表明,除梭梭外,其他 6 种灌木根际 H_2O -P 含量均低于非根际;驼绒藜根际 $NaHCO_3$ -Pi, $DHCl$ -Pi 和 $HHCl$ -Pi 均显著低于非根际土壤;除霸王外,而其余 6 种灌木 $NaOH$ -Pi 均在根际出现富集,其中沙冬青,红砂差异性显著;除沙木蓼根际 $DHCl$ -Pi, $HHCl$ -Pi 含量高于非根际外,其余 6 种灌木根际 $DHCl$ -Pi, $HHCl$ -Pi 含量均低于非根际。

(4) 除沙冬青外,其余 6 种灌木根际 $NaOH$ -Po 均低于非根际土壤;7 种灌木根际 $HHCl$ -Po 含量均低于非根际土壤。

(5) 根际有效磷与根际 pH 相关性极显著,非根际有效磷与非根际 pH 相关性显著。

Reference:

- [1] Zhang J L, Goerge E. Changes in the extractability of cations (Ca, Mg and K) in the rhizosphere soil of Norway spruce (*Picea abies*) roots. *Plant and Soil*, 2002, 243:209-217.
- [2] Shi W, Wang X, Yan W. Distribution patterns of available P and K in rape rhizosphere in relation to genotypic difference. *Plant and Soil*, 2004, 261: 11-16.
- [3] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 2001, 237: 173-195.
- [4] Shen H, KIKUI satoshi, Yan X L, MATSUMOTO Hideaki. Mobilization of insoluble aluminum bound phosphate by soybean root exudates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 68-70.
- [5] 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, 16(3): 106-110.
- [6] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere — a critical review. *Plant and Soil*, 1998, 205: 25-44.
- [7] Lambers H, Shane M W, Cramer M D, Pearse S J, Veneklaas E J. Root structure and functioning for efficient acquisition of Phosphorus: matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany*, 2006, 98:693-713.
- [8] Raghothama K G, Karthikeyan A S. Phosphate acquisition. *Plant and Soil*, 2005, 274:37-49.
- [9] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 1990.
- [10] Su Z Y, Zhao H L, Zhang T H. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 802-806.
- [11] Zhan Y Y, Xue Z Y, Ren W, Zhou Z Y. Characteristics of nitrogen contest between rhizosphere and bulk soil under seven shrubs in arid desert area of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 59-66.
- [12] 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.
- [13] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction//Carter M R ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*: Canadian Society of Soil Sci., 1993.
- [14] Sui Y S, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids. *Soil Sci. Soc.*, 1999, (63):1174-1180.
- [15] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, Compton B L, Blamey F P C. A simplified, sequential phosphorus fractionation method. In: *Communications in Soil Science & Plant Analysis*: Taylor & Francis, 2000.
- [16] Zhang J H, Zou C J, Zhou Y M, Han S J, Chen Y L. Characteristic of available P in the rhizosphere soil in pure *Juglans mandshurica* and *Larix gmelinii* and their mixed plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 790-794.
- [17] Zhang Y D, Bai S B, Wang Z Q, Wang Q C. Soil P availability in larch rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (1): 31-34.
- [18] Ge L P, Ma J, Li Y. Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 7(9): 3065-3571.
- [19] Wandruszka R. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical Transactions*, 2006, 7: 6-14.
- [20] Kirk G J D. Modelling root-induced solubilization of nutrients. *Plant and Soil*, 2002, 245 (1): 49-57.
- [21] Owen A G, Godboid D L, Jones D L. Organic acid mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34 (5): 703-710.
- [22] Hou J, Ye F G, Zhang L H. A summary of studies on rhizosphere soil of trees protection. *Forest Science and Technology*, 2006, (1): 30-33.
- [23] 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.
- [24] Zoysa A K N, Loganathan P, Hedley M J. A technique for studying rhizosphere processes in tree crops; soil phosphorus depletion around camellia (*Camellia japonica* L.) roots. *Plant and Soil*, 1997, 190: 253-265.
- [25] Cheng R X, Jia P. Phosphorus Fractions and Availability of Tropical Soil in Rubber Plantation. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(4): 284-286.
- [26] Strauss R, Brümmer G W, Barrow N J. Effects of crystallinity of goethite II. Rates of sorption and desorption of phosphate. *Eur. J. Soil Sci.* 1997, 48: 101-114.
- [27] Zheng Z, MacLeod J A, Sanderson J B, Lafond J. Soil phosphorus dynamics after ten annual applications of mineral fertilizers and liquid dairy manure: fractionation and path analyses. *Soil Sci.*, 2004, 169: 449-456.
- [28] Delgado A, Madrid A, Kassem S, Andreu L, Del C. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soil amended with humic and fulvic acids. *Plant and Soil*, 2002, 245:277-286.
- [29] Hedley M J. Method to measure microbial phosphorus in soil. *Soil Biology And Biochemistry*, 1982, 14:337-385.

参考文献:

- [4] 沈宏,菊井森土,严小龙,松本英明.大豆根分泌物活化难溶性铝磷的研究. *水土保持学报*, 2005,19(1):68-70.
- [5] 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*,2005,16(3):106-110.
- [10] 苏永中,赵哈林,张铜会.几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. *应用生态学报*,2002,13(7):802-806.
- [11] 詹媛媛,薛梓瑜,任伟,周志宇.干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征. *生态学报*,2009,29(1):59-66
- [16] 张军辉,邹春静,周玉梅,韩士杰,陈永亮.胡桃楸、落叶松纯林及其混交林根际土壤有效磷特性的研究. *应用生态学报*,2002,13(7):790-794.
- [18] 张彦东,白尚斌,王政权,王庆成.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.
- [19] 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):3065-3571.
- [22] 侯杰,功富裕.林木根际土壤研究进展. *防护林科技*,2006,1:30-33.
- [25] 成瑞喜,贾平.中酸性土壤无机磷形态及其有效性. *热带亚热带土壤科学*,1998,7(1):6-10.