

DOI: 10.11766/trxb202403290141

CSTR: 32215.14.trxb202403290141

韩超群, 王娇, 赵春雷, 邵明安. 毛乌素沙地典型人工植被根际土壤磷形态特征[J]. 土壤学报, 2025, 62 (1): 165–176.

HAN Chaoqun, WANG Jiao, ZHAO Chunlei, SHAO Ming'an. Phosphorus Speciation Characteristics of Typical Artificial Vegetation Rhizosphere Soil in Mu Us Sandy Land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (1): 165–176.

毛乌素沙地典型人工植被根际土壤磷形态特征*

韩超群¹, 王 娇^{2†}, 赵春雷², 邵明安^{1, 2†}

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所黄河三角洲现代农业工程实验室, 北京 100101)

摘 要: 人工植被对毛乌素沙地生态系统恢复具有重要作用, 了解典型人工植被根际与非根际土壤磷 (P) 形态特征, 可为该区科学开展植被建设提供依据。采集毛乌素沙地 7 种典型人工植被 (樟子松、小叶杨、长柄扁桃、紫穗槐、沙柳、臭柏和沙蒿) 根际和非根际土壤, 采用蒋柏藩-顾益初分级方法对比分析不同形态 P 含量。结果表明, 沙柳根际土全磷 (TP) 含量显著高于其他植被, 小叶杨、长柄扁桃和沙蒿根际土有效磷 (AP) 含量显著高于非根际土, 表明种植小叶杨等 3 种植被有利于 AP 的活化; 不同植物根际土与非根际土之间 P 形态差异显著: 樟子松、长柄扁桃、紫穗槐和沙柳 4 种人工植被根际土八钙型磷酸盐 ($\text{Ca}_8\text{-P}$) 含量均低于非根际土, 紫穗槐根际土铝结合态磷 (Al-P) 和铁结合态磷 (Fe-P) 较非根际土降幅最大, 沙柳根际和非根际土的十钙型磷酸盐 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 含量差异相对较小。Al-P 和 Fe-P 在大多数植被根际土壤中与 AP 呈显著正相关关系, 是参与土壤 P 转化的主要形态。研究结果从土壤磷可持续角度为现有人工林的管理和种植模式布局提供了科学依据。

关键词: 毛乌素沙地; 人工植被; 根际效应; 磷形态; 磷有效性

中图分类号: S158.5 **文献标志码:** A

Phosphorus Speciation Characteristics of Typical Artificial Vegetation Rhizosphere Soil in Mu Us Sandy Land

HAN Chaoqun¹, WANG Jiao^{2†}, ZHAO Chunlei², SHAO Ming'an^{1, 2†}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yellow River Delta Modern Agricultural Engineering Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] Artificial vegetation plays an important role in the restoration of the ecosystem in Mu Us Sandy Land. Understanding the phosphorus (P) forms in the rhizosphere and bulk soils of typical artificial vegetation can provide a basis for scientific vegetation construction in the area. [Method] The rhizosphere soil and bulk soil of seven typical artificial vegetations (*Pinus sylvestris*, *Populus simonii*, *Amygdalus pedunculata*, *Amorpha fruticosa*, *Salix psammophila*, *Sabina vulgaris*, and *Artemisia ordosica*) in Mu Us Sandy Land were collected and the phosphorus content of different forms were subsequently

* 国家自然科学基金项目 (42107331) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42107331)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangjiao@igsrnr.ac.cn; mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 韩超群 (1995—), 女, 山西洪洞人, 博士研究生, 主要从事沙地生态恢复研究。E-mail: hancq@nwafu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-29; 收到修改稿日期: 2024-05-10; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-07-22

determined using Jiang-Gu phosphorus fractionation method. 【Result】 The results showed that 1) The total phosphorus (TP) content of *Salix psammophila* rhizosphere soil was significantly higher than that of other vegetation types while *Populus simonii*, *Amygdalus pedunculata*, and *Artemisia ordosica* increased available phosphorus (AP) content in rhizosphere soil. This indicates that planting *Populus simonii* and the other 3 vegetation types was beneficial for P activation. 2) The $\text{Ca}_8\text{-P}$ content in rhizosphere soil of *Pinus sylvestris*, *Amygdalus pedunculata*, *Amorpha fruticosa*, and *Salix psammophila* was lower than in the bulk soil. The decrease in Al-P and Fe-P in *Amorpha fruticosa* rhizosphere soil was the largest, and the difference in $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ content between rhizosphere and bulk soil was the smallest in *Salix psammophila*. 【Conclusion】 Al-P and Fe-P showed a significant positive correlation with AP in most vegetation rhizosphere soils and were the main forms involved in soil P transformation. This study provides scientific evidence and directives for the management and planting pattern layout of plantations to promote sustainable P management.

Key words: Mu Us Sandy Land; Artificial vegetation; Rhizosphere effect; Phosphorus speciation; Phosphorus availability

磷 (P) 是植被生长的必需营养元素之一, 对沙地生态系统植被恢复与可持续发展至关重要^[1]。沙地土壤 P 多来源于风成砂性母质, 因而全磷 (TP) 含量通常较低, 在干旱半干旱地区, 大气干湿沉降带来的土壤细颗粒和植物碎屑是土壤 P 输入的重要来源^[2]。且 P 多与钙、铁、铝等金属离子结合形成难溶性磷矿物, 土壤中仅少量可溶性磷可直接被植物吸收利用^[3]。与较湿润环境相比, 干旱土壤中 P 的最大吸附量和土壤有效磷 (AP) 含量均显著降低^[4-5]。因此, P 通常是干旱半干旱地区沙地生态系统的限制性养分。

毛乌素沙地历史上是水草肥美的生态宜居地, 经过长期过度樵采、滥牧滥垦和采矿活动, 现已成为我国荒漠化程度较严重的地区之一^[6]。为了阻止生态环境进一步恶化, 我国开展了大量生态恢复工作^[7], 樟子松、长柄扁桃和紫穗槐等耐旱植物被广泛推广和种植, 荒漠化土地得到有效治理^[8-9]。随着植被覆盖状况的改善, 人工植被通过多种途径改变土壤 P 现状, 通过分泌有机酸阴离子、改变根系结构等途径发挥自身生物潜力从土壤中获取 AP, 也可以通过改变土壤微生物群落组成和磷酸酶活性影响土壤 P 循环^[10]。植被生长与土壤 P 形态转化密切相关^[11]。一方面, 植物根系吸收土壤中的可溶性磷酸盐, 土壤 P 库在根系和环境的作用下补充磷酸根离子 (PO_4^{3-}), 这使得土壤 P 在有效和缓效的形态间可逆转移^[12]; 另一方面, 植物凋落物补充土壤 P 库, 促进土壤 P 营养的循环^[12]。然而, 人工林对土壤 P 库盈亏、形态转化及有效性的影响尚未有统一结论。李森等^[13]研究表明在高寒沙地进行植被恢复可以有

效增加沙地 TP 含量及 P 储量, 其中灌草间作的效果优于灌木和草本单独种植; 薛梓瑜等^[14]的研究结果表明阿拉善干旱荒漠草地 6 种灌木根系活动可以活化土壤钙结合态磷, 从而提高根际土壤 P 有效性; 赵琼等^[15]在科尔沁沙地的研究也指出人工造林可有效促进有机磷的矿化, 提高其有效性。但也有研究表明人工植被会加剧沙地 P 亏缺。Odum 经典理论认为, 生态系统在演替过程中朝着 AP 稀缺的方向发展。樟子松人工林的持续生长会导致沙地土壤 TP 含量进一步降低^[15]; 紫穗槐根际对 AP 的富集率可达 18.7%, 但这一数值随林龄增加逐渐降低^[16]; Yu 等^[17]研究表明, 天然恢复植被可以促进土壤 P 的积累, 而人工乔木林根际土壤 TP 随着林龄增加而减少, 人工林的持续生长可能会导致生态系统内 P 损失, 进而造成人工林退化。

植被恢复是毛乌素沙地荒漠化防治和生态环境治理最有效的途径之一^[6]。以往研究多考虑土壤水分作为植被恢复的制约性因子^[7, 18], 却鲜少关注土壤 P 的限制作用及植被恢复对沙地 P 状况的影响。李金辉等^[16]对毛乌素沙地紫穗槐土壤 P 组分进行了定量分析, 指出紫穗槐根际土 AP 和不同形态 P 与非根际土差异显著, 证实了植被建设对土壤 P 库的影响。然而, 土壤 P 变化因植被恢复类型而异, 其他人工植被对土壤中 P 及不同形态 P 含量的影响尚不明确。因此, 本研究对毛乌素沙地 7 种典型人工植被 (包括乔木、灌木和半灌木) 根际土中的 P 含量和 P 形态进行对比和分析, 旨在揭示典型人工植被根际养分利用情况和植被恢复过程中土壤 P 库的响应规律, 对深入认识沙地土壤 P 有效性具有重要意

义,以期从土壤 P 可持续角度为毛乌素沙地植被恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于陕西省、宁夏回族自治区和内蒙古自治区交汇处 (37°27.5′–39°22.5′N, 107°20′–111°30′E), 面积约 4.22×10⁶ hm², 是典型农牧交错带。该地区属于温带大陆性干旱半干旱季风气候, 多年平均气温 6.0~8.5 °C, 多年平均降水量 250~440 mm^[19]。大部分土壤为淡栗钙土, 向西北逐渐为棕钙土半荒漠地带, 向西南逐渐为灰钙土半荒漠地带, 向东南逐渐为黄土高原灰褐土, 从西至东由半荒漠地带过渡至森林草原地带^[20]。本研究区域位于陕西省神木市毛乌素治沙造林基地 (38°53′N, 109°52′E), 基地始建于 2003 年, 土壤类型为风沙土, 总绿化面积 42.8 万亩 (1 hm² = 15 亩), 植被类型以次生人工林、草为主, 林草覆盖率达到 65%。其中樟子松 16 万亩, 紫穗槐和长柄扁桃混交林 8 万~10 万亩, 沙柳 3 万亩, 小叶杨、沙柳、臭柏、沙蒿和其他树种若干亩。

1.2 样品采集

在研究区域内采集樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata*)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、沙柳 (*Salix psammophila*)、臭柏 (*Sabina vulgaris*)、沙蒿 (*Artemisia ordosica*) 7 种常见人工恢复植被的根际土与非根际土样。每种植物选择 4 块立地条件基本一致的林地进行采样, 其中长柄扁桃和紫穗槐、沙柳和沙蒿为混交林, 单一林地设 10 m×10 m 样地, 混交林设 30 m×30 m 样地。在样地中随机选取 3 株长势平均的植株, 分别在距植株水平距离 0、20、40 cm 处进行取样, 具体方法为: 清除地表杂草、石子和凋落物后, 挖掘 20 cm 深土壤剖面, 用刷子轻扫土壤直至根系裸露, 然后用药匙刮取根系表面附着土壤, 置于自封袋中保存, 每株植物在四个不同方向取样后混合作为一个样品, 同时采集植物根际土附近的非根际土作为参照。土壤样品自然风干后分别过 1 mm 筛和 0.149 mm 筛, 常温保存供分析用。

1.3 项目测试与方法

土壤 TP 采用 H₂SO₄-HClO₄ 消解-钼锑抗比色法测定, 无机磷采用 H₂SO₄ 浸提-钼锑抗比色法方法测定^[21]。AP 包括二钙型磷酸盐 (Ca₂-P) 和易交换性磷, 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[22]。土壤全磷密度 (TPD) 计算公式为: TPD = TP × D × H × (1 - 0.01G), 其中 TP 为土壤全磷含量, D 为土壤容重, H 为土层深度, G 为 >2 mm 砾石质量百分含量, D 由环刀采样测定所得, G 取 0%^[21]。

土壤无机磷形态采用文献[23]分级方法测定, 该方法通过连续浸提将土壤 P 赋存形态分为 Ca₂-P、八钙型磷酸盐 (Ca₈-P)、铝结合态磷 (Al-P)、铁结合态磷 (Fe-P)、闭蓄态磷酸盐 (O-P) 及十钙型磷酸盐 (Ca₁₀-P), 具体方法为: 依次利用 0.25 mol·L⁻¹ NaHCO₃、0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc、0.5 mol·L⁻¹ NH₄F、0.1 mol·L⁻¹ NaOH-0.1 mol·L⁻¹ Na₂CO₃、0.11 mol·L⁻¹ Na₂S₂O₄ + 0.11 mol·L⁻¹ Na₂B₄O₇ 和 0.25 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 进行连续浸提。

土壤全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定, 土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾加热法测定, 土壤 pH 采用电极法测定 (水土比为 2.5 : 1)^[21]。

各人工植被根际土壤基本化学性质见表 1。

1.4 数据处理

用 Excel 和 SPSS 25 对数据进行计算和统计分析; 采用独立样本 *t* 检验和单因素方差分析对不同处理间差异显著性进行比较; 对各形态无机磷和 AP 进行皮尔逊相关性分析; 利用 Origin 9.0 绘图。

2 结果

2.1 不同人工植被根际土 P 含量特征

本研究中的 7 种人工植被根际土 TP 含量为 176.77~305.31 mg·kg⁻¹ (图 1a), TPD 为 0.59~1.02 kg·m⁻² (图 1b); 非根际土 TP 含量为 370.24~583.13 mg·kg⁻¹, TPD 为 1.24~1.95 kg·m⁻²。7 种植物非根际土 TP 含量较根际土高 56.30%~210.26%, 根际土 TPD 高于非根际土 47.36%~182.09%, 但仅紫穗槐、沙柳和臭柏 3 种植物非根际土 AP 含量高于根际土 (图 1c)。沙柳根际土 TP 含量显著高于其他植被, 其余 6 种植物根际土 TP 含量在 *P*<0.05 水

平上无显著差异。小叶杨根际土 AP 含量为 $12.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于其他 6 种植被 (图 1c), 长柄扁桃次之, 樟子松、紫穗槐和臭柏最低, 为 $2.14\sim 2.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除小叶杨外, 本研究中人工植被根际

土 AP 含量均低于 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表明土壤处于 AP 缺乏状态。与非根际土相比, 小叶杨、长柄扁桃和沙蒿根际土 AP 含量较高, 紫穗槐、沙柳和臭柏与 TP 一致, 表现为根际土低于非根际土。

表 1 不同人工植被根际土壤基本化学性质

Table 1 Soil basic chemical properties in the rhizosphere of different artificial vegetations

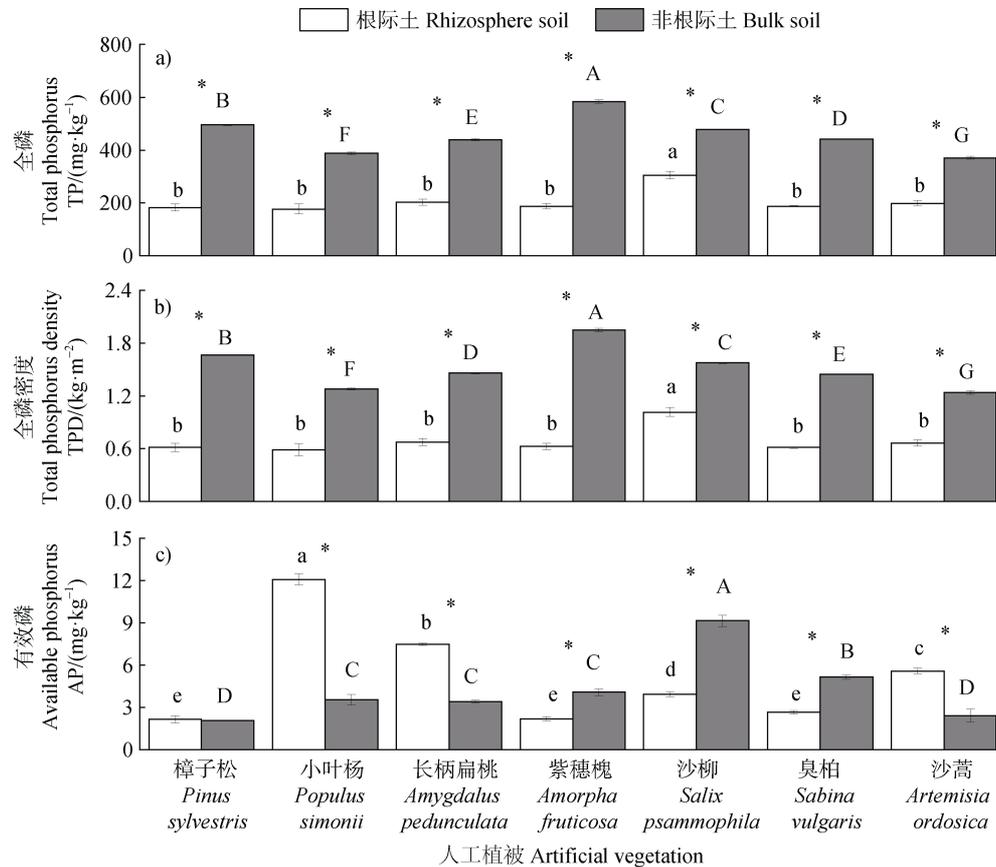
距植株水平距离 Horizontal distance from plant/cm	人工植被 Artificial vegetation	pH	土壤有机碳 Soil organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	5.46±0.03f	1.47±0.14e	0.43±0.01f
	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	6.77±0.04d	4.69±0.05b	1.84±0.01b
	长柄扁桃 <i>Amygdalus pedunculata</i>	6.62±0.04e	2.27±0.07cd	1.02±0.02c
	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	7.07±0.03c	2.09±0.07d	0.84±0.01d
	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	7.85±0.06a	5.66±0.20a	2.48±0.03a
	臭柏 <i>Sabina vulgaris</i>	7.56±0.02b	2.87±0.23c	1.05±0.01c
	沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	7.95±0.01a	1.29±0.36e	0.63±0.01e
20	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	6.22±0.03g	1.25±0.12cd	0.52±0.15b
	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	7.24±0.01d	2.39±0.01b	0.75±0.12b
	长柄扁桃 <i>Amygdalus pedunculata</i>	6.66±0.01f	1.16±0.08d	0.58±0.05b
	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	7.10±0.02e	1.48±0.03c	0.59±0.05b
	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	8.46±0.02a	2.98±0.04a	1.28±0.01a
	臭柏 <i>Sabina vulgaris</i>	7.80±0.01c	1.15±0.01d	0.54±0.01b
	沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	8.02±0.01b	1.27±0.11cd	0.58±0.00b
40	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	6.56±0.02e	1.06±0.05f	0.41±0.00f
	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	7.49±0.02c	1.99±0.00b	0.74±0.00c
	长柄扁桃 <i>Amygdalus pedunculata</i>	7.12±0.01d	1.27±0.02e	0.60±0.00d
	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	7.12±0.00d	1.38±0.01d	0.54±0.01e
	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	7.87±0.04b	3.70±0.04a	1.67±0.01a
	臭柏 <i>Sabina vulgaris</i>	7.92±0.03b	1.76±0.01c	0.84±0.02b
	沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	8.05±0.02a	1.40±0.01d	0.58±0.01d

注: 数值为平均值±标准误。不同小写字母表示不同植被间差异显著 ($P<0.05$)。Note: The values in the table are mean ± SE. Different lowercase letters indicate significant differences between soils under types of vegetation at the level of 0.05.

2.2 不同恢复植被根际土无机磷形态特征

不同组分 P 的分布情况可以反映植物对土壤养分的利用和潜在的环境影响^[22]。图 2 显示了不同植物根际土和非根际土各形态无机磷含量。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是最容易被植物吸收的磷形态, 如图 2a 所示, 根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量范围为 $1.60\sim 10.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 小叶杨根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量显著高于其他植被 ($P<0.05$),

樟子松、紫穗槐、沙柳和沙蒿间根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量无显著差异, 但均低于长柄扁桃 ($P<0.05$)。对比不同植物根际土与非根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量可以发现, 小叶杨根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量较非根际土高 10.42% ($P<0.05$), 紫穗槐和沙柳根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量较非根际土低 57.66%~72.71% ($P<0.05$), 其他植被根际和非根际土的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量不存在显著差异 ($P>0.05$)。



注：不同小写字母和大写字母分别表示植被间根际土和非根际土含量差异显著 ($P < 0.05$)，*表示根际土与非根际土之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase and uppercase letters in the figure respectively indicate significant differences between different vegetation in the rhizosphere and bulk soil ($P < 0.05$), * indicate significant differences between rhizosphere and bulk soil for each plant ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同人工植被根际和非根际土 TP、TPD 和 AP 含量

Fig. 1 Total phosphorus, total phosphorus density, and available phosphorus contents in the rhizosphere soil and bulk soil of different artificial vegetations

$\text{Ca}_8\text{-P}$ 较易溶解，常作为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 补充磷源，其在樟子松、长柄扁桃、紫穗槐和沙柳 4 种人工植被根际中含量较非根际土低 45.45%~54.42%，其余植被根际土 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量与非根际土无显著差异 (图 2b)。

多数人工植被根际土 Al-P 和 Fe-P 含量低于非根际土 (图 2c 和图 2d)。如图 2c 所示，小叶杨根际土 Al-P 含量与非根际土之间无显著差异，但其他 6 种植物根际土 Al-P 含量与非根际土相比显著减少 47.35%~76.32%，表明小叶杨根际对 Al-P 的吸收少于其他植被。除臭柏外，其他 6 种植物非根际土的 Fe-P 含量均显著高于根际土 ($P < 0.05$)，是根际土 Fe-P 含量的 1.65 倍~4.12 倍 (图 2d)。紫穗槐根际土 Al-P 和 Fe-P 较非根际土差异最大，分别较非根

际土低 76.32%和 75.32%，表明紫穗槐对 Al-P 和 Fe-P 的需求可能高于其他植被。

本研究中 7 种植物根际土 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量均显著低于非根际土 (图 2e 和图 2f)。7 种植物非根际土 O-P 含量无显著差异，但在人工植被根际土中，O-P 含量较非根际土减少了 68.38%~80.99%，表明沙地土壤中 O-P 可以被植被利用。不同植物根际土 O-P 含量也表现出一定差异，沙柳根际土 O-P 含量显著高于除臭柏之外的其他 5 种植物，樟子松根际土 O-P 含量与紫穗槐和沙蒿间无差异，但较其他 4 种植物偏低 ($P < 0.05$)。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 主要为羟基磷灰石，是较稳定的磷形态。与非根际土相比，7 种植物根际土 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量减少了 34.02%~67.48% ($P <$

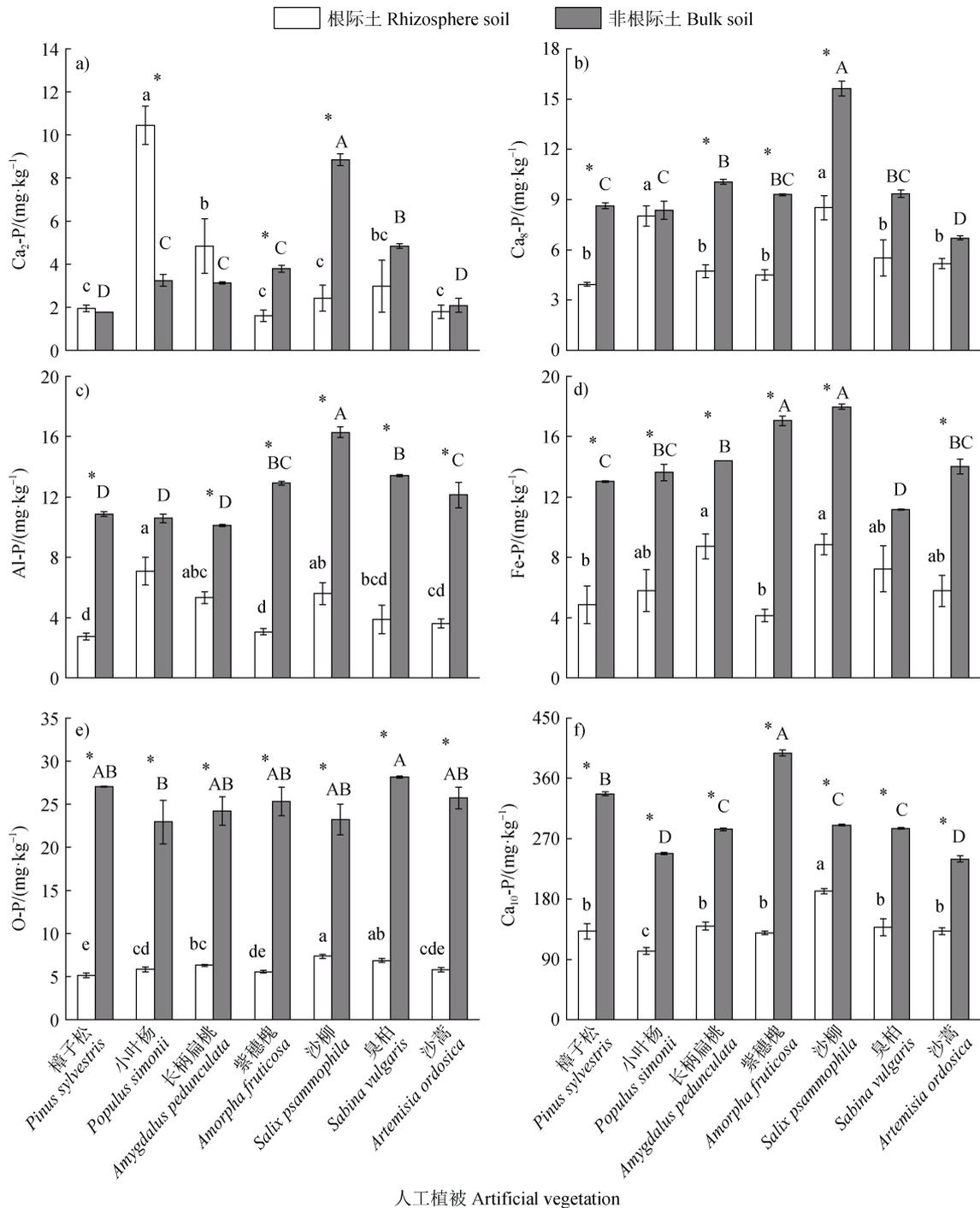


图 2 不同人工植被根际和非根际土壤无机磷形态特征

Fig. 2 Inorganic phosphorus fraction in the rhizosphere soil and bulk soil of different artificial vegetations

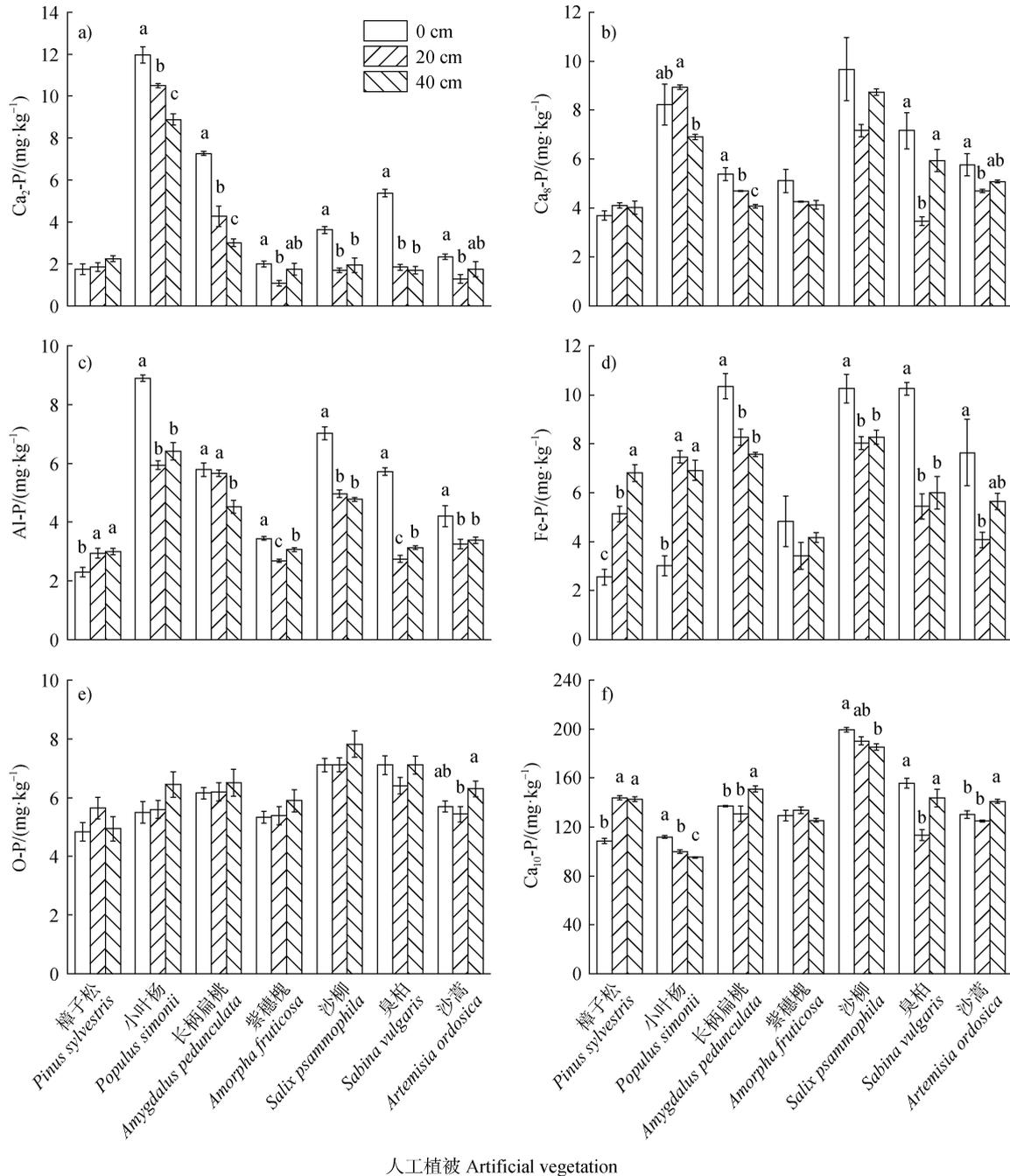
0.05, 图 2f), 其中樟子松、小叶杨、长柄扁桃、紫穗槐和臭柏 5 种植物根际土 Ca₁₀-P 含量比非根际土减少超过 50%, 表明这 5 种植物对 Ca₁₀-P 的利用程度很高, 而沙柳根际和非根际土的 Ca₁₀-P 含量差异最小。

植被根系向深处生长的同时向外围延伸, 根系

生物量随水平距离的增加逐渐减少。从剖面分布角度可分为水平根型、垂直根型、斜生根型、复合根型和变态根型等类型, 其生物量、根长密度、细根根长等方面存在差异^[24], 对土壤 P 的吸收利用和活化程度不同, 因此不同恢复植被下土壤 P 在水平方向上可能形成斑块差异。因此, 根据一般植被的根

幅范围,进一步采集距树基 0、20、40 cm 三个水平距离的根际土样品,以探究人工植被对土壤 P 的影响在水平方向上的差异。如图 3 所示,大多数植被根际土中的无机磷形态表现出水平方向的差异,但对于 O-P (图 3e),除沙蒿外,所有植被根际土不同

距离处均无显著差异。樟子松根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量在不同距离处无显著差异(图 3a 和图 3b),Fe-P 含量随着距离的增加而增大(图 3d),Al-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在 20 cm 处显著高于 0 cm 处(图 3c 和图 3f),但与 40 cm 处无显著差异。小叶杨根际土 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和



注:不同小写字母表示不同距离处各形态无机磷含量差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between inorganic phosphorus fractions in different horizontal positions ($P<0.05$).

图 3 水平方向不同人工植被根际土无机磷形态特征

Fig. 3 Horizontal direction inorganic phosphorus fraction in the rhizosphere soil of different artificial vegetation

Ca₁₀-P 含量与植株距离成反比,距植株 0 cm 处 Al-P 显著高于其他距离,Fe-P 与 Al-P 相反。长柄扁桃根际土 Ca₂-P 和 Ca₈-P 含量随着与植株距离的增加而减少,Al-P 和 Fe-P 在距植株 0 cm 处含量显著高于距植株 40 cm 处,而 Ca₁₀-P 则相反。紫穗槐根际土仅 Al-P 含量在不同距离处存在显著差异,表现为 0 cm > 40 cm > 20 cm。沙柳根际 Ca₂-P、Al-P 和 Fe-P 表现为距植株 0 cm 处含量高于 20 和 40 cm 处,O-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 含量在不同距离处无显著差异。沙蒿根际 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Fe-P 含量均表现为 0 cm 处高于 40 cm 处,但 20 和 40 cm 处之间无差异;而 O-P 和 Ca₁₀-P 则 20 cm 处含量低于 40 cm 处,与 0 cm 处无差异。臭柏根际 Ca₈-P、Al-P 和 Ca₁₀-P 在距植株 20 cm 处含量最低,Ca₂-P 和 Fe-P 含量在 20 cm 和 40 cm 处显著低于 0 cm。总体而言,O-P 含量在水平方向差异最小,而多数植物根际土 Ca₂-P 和 Al-P 含量在距植株 0 cm 处最高。

2.3 人工恢复植被根际土无机磷形态对 AP 的影响

对沙地人工植被根际土 pH、SOC、TP、TN 与 AP 进行相关性分析,结果显示,土壤 SOC 和 TN 均与 TP 呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$),但与 AP 相关性不显著 ($P > 0.05$) (图 4)。土壤 pH 与 AP 的相关系数 (r) 为 0.251 ($P = 0.10$),TP 与 AP 之间 $r = 0.016$ ($P = 0.92$),土壤 pH 与 AP 之间、TP 与 AP 之间均无显著相关关系。

樟子松和沙蒿根际土各形态无机磷与 AP 均无显著相关性 (图 5),表明其他形态无机磷转化并不是樟子松和沙蒿根际获取 AP 的主要途径。小叶杨根际土中 AP 与 Al-P 和 Ca₁₀-P 有显著正相关关系,而与 Fe-P 则呈显著负相关关系 ($r = -0.772^*$, $P < 0.05$),可见小叶杨根系具有促使 Al-P 和 Ca₁₀-P 向 Ca₂-P 转化的作用,且对土壤 P 库的利用能力较强。沙柳和臭柏根际土的 Al-P 和 Fe-P 均与 AP 显著正相关,其中 Al-P 与 AP 相关系数 r 高达 0.945~0.982。长柄扁桃根际土 AP 与 Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 呈极显著正相关关系 ($r = 0.890^{**}$, $P < 0.01$),紫穗槐根际土中仅 Al-P 与 AP 有正相关性。整体而言,本研究中有 5 种人工植被根际土 AP 与 Al-P 相关性显著,4 种人工植被与 Fe-P 相关性显著,表明沙地土壤中 Al-P 较多地参与土壤 P 形态转化,其次为 Fe-P。

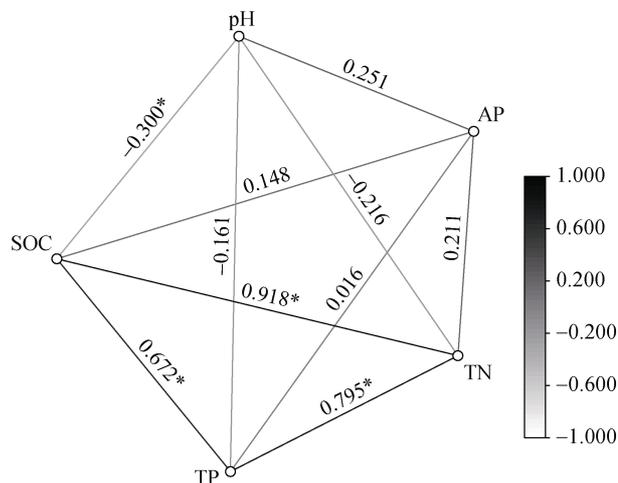


图 4 TP、pH、SOC 和 TN 与 AP 的相关关系

Fig. 4 Correlation analysis between total phosphorus, pH, soil organic carbon, total nitrogen, and available phosphorus

3 讨论

3.1 人工植被根际土 TP 和 AP 含量特征

P 在沙地中含量少且不易为植物利用,因而被认为是干旱区生态系统生产力和重要生态过程的限制性营养元素^[25]。土壤 P 补充主要通过植被凋落物分解实现,然而,毛乌素沙地气候干旱,凋落物分解缓慢,对土壤 P 的补充较少,不同人工植被根系分泌物、凋落物性质及生态位的差异会导致土壤 P 含量差异显著。本研究中,多数人工恢复植被根际土 TP 低于非根际土,这与以往研究一致,虽然根系的存在可以促进土壤 P 向根际迁移,但由于植物根系吸收,根际土 P 含量通常低于非根际^[26-27]。李金辉等^[16]研究发现,毛乌素沙地紫穗槐根际土 TP 含量受植被恢复年限影响,其中 28 年生紫穗槐根际土壤 TP 含量较非根际土显著降低,但 35 年生紫穗槐根际与非根际土 TP 的差异却不显著。随着紫穗槐种植年限的增加,其根际土有机质含量逐渐增多,可能会影响 P 的移动进而改变根际土中 P 的含量^[28]。樟子松和小叶杨两种乔木根际土 TP 显著小于非根际土,这与 Liao 等^[29]在青藏高原沙地的研究结果一致,这可能是由于乔木凋落物归还的 P 不足以维持其生长需求,土壤 P 库中 P 不断地转移到地上植物体内^[15]。其中,樟子松为常绿乔木,地上生物量积累的 P 相对较多,因而导致根际土 TP 含量少^[30]。在 7 种植被中,沙柳根际土 TP 显著高于其他人工植

被 ($P < 0.05$)，这一方面是由于沙柳根际 SOC 含量最高 (表 1)，较其他植被而言更有利于调动 P 向根际移动^[28]；此外，已有研究表明沙柳根际土中微生物数量和酶活性均高于沙蒿和臭柏^[31]，因而可有效促

进凋落物分解，提高根际 P 含量。沙柳是毛乌素沙地分布最广泛的优势灌木，其根系的含水率和生物量在整个植株中占比最大^[32]，这一特殊生理结构使其适应干旱贫瘠土壤，是一种优良的固沙作物。

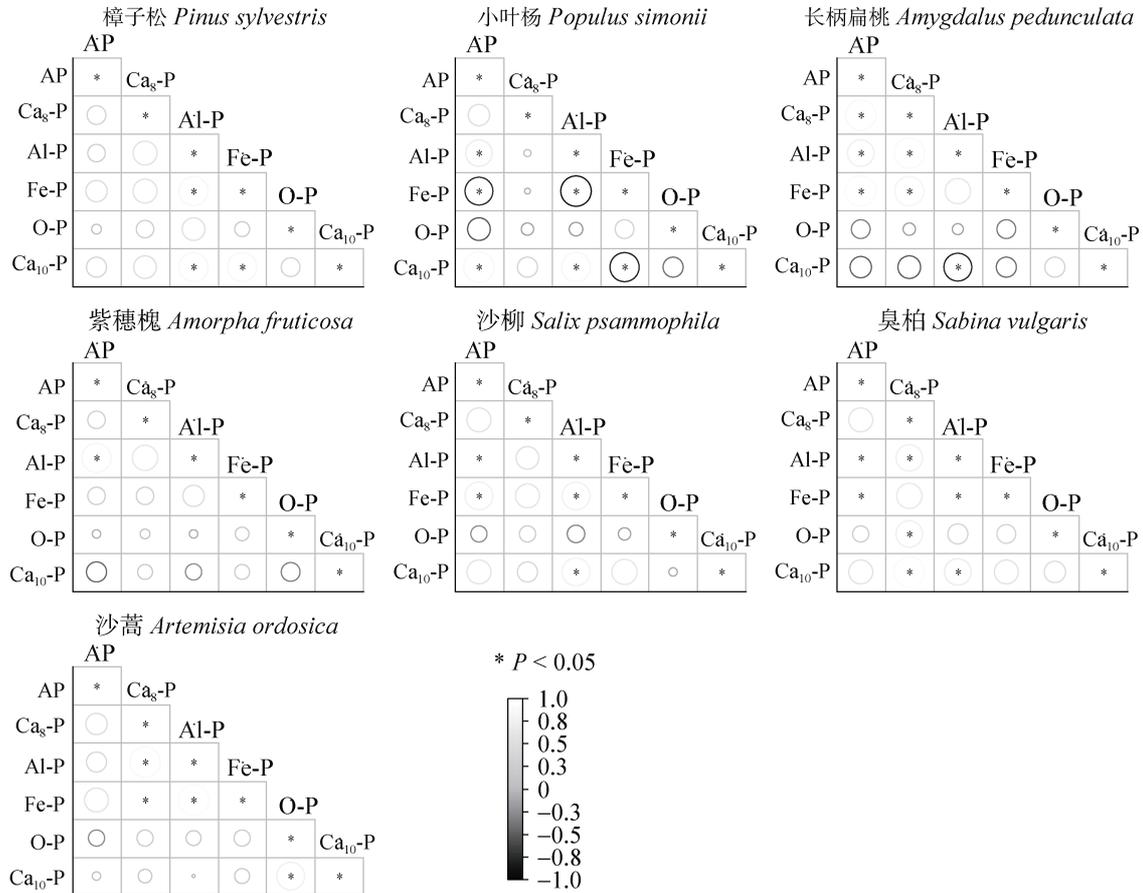


图 5 不同人工植被根际土无机磷与 AP 相关关系

Fig. 5 Correlations between inorganic phosphorus forms and available phosphorus in the rhizosphere soil of different artificial vegetations

植被根际土 AP 由于根系吸收通常出现亏缺^[33]。本研究中的紫穗槐、沙柳和臭柏等 3 种人工植被根际土 AP 均低于非根际土，与上述研究结果一致。陈闻等^[34]发现毛乌素沙地人工植被样地中的 AP 显著低于裸地，并分析是植物生长所必需的 P 几乎全部来源于土壤导致的。然而，小叶杨、长柄扁桃和沙蒿根际土 AP 则高于非根际土，尤其是小叶杨，其根际土壤 AP 呈现明显的富集现象，这可能是由于这 3 种植被根际 P 活化能力很强，根系对 P 的活化速率大于从土壤中吸收 P 的速率，此外，有研究指出小叶杨根际对 AP 有明显富集作用（富集率为 36.02%）^[35]。上述结果表明种植小叶杨、长柄扁桃和沙蒿有利于增加沙地土壤 AP，而 Stark 等^[36]研究也表明在生态系统恢复期种植杨树，有利于提高土

壤肥力和生产力。沙蒿是本研究中唯一草本植被，其根际土 AP 含量高于 Ca₂-P，这可能是由于沙蒿根区土壤水分条件较好，有较多的易溶性磷或吸附态磷。樟子松根际土壤 AP 与非根际土无显著差异，说明其根系对 AP 的活化和吸收速率接近。

3.2 人工植被根际土无机磷形态特征及其对 AP 的影响

铁/铝结合态磷 (Al/Fe-P) 是土壤中铁/铝氧化物或氢氧化物结合态的 P，因其结晶性较差，对植物具有一定的有效性^[37]。当土壤中出现其他阴离子被铁/铝矿物非专性吸附时，磷酸根离子被释放，游离的 H₂PO₄⁻ 和 HPO₄²⁻ 一部分被植物吸收，另一部分重新与矿物结合^[38]。本研究中，AP 在小叶杨、长柄扁桃、沙柳和臭柏根际土中与 Al-P 显著正相关，在

长柄扁桃、沙柳和臭柏根际土中与 Fe-P 显著正相关,体现了人工植被调动的游离 P 被铁/铝矿物固定。然而,小叶杨根际土中 AP 和 Al-P 均与 Fe-P 呈显著负相关关系,这可能是小叶杨根际诱导土壤 Fe-P 转化为 AP 和 Al-P,而小叶杨根际 Al-P 含量与非根际土无差异,Fe-P 低于非根际土,也可证实这一点。在中性或碱性环境中, Ca^{2+} 是碱性土壤溶液中的主要阳离子,本研究中的 7 种人工植被根际土无机磷均以 Ca-P 为主,这与以往对沙地人工 P 形态的研究结果一致^[15-16]。Andersson 等^[39]研究发现土壤酸化过程中大量 Ca-P 溶解,提高土壤 AP 含量。本研究中樟子松根际土 pH 为 5.46~6.56,显著低于其他人工植被,而 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量也较低,表明樟子松根系活动可导致根际土壤酸化,进而促进了 Ca-P 的溶解。Hinsinger^[40]也指出了樟子松根系活动能有效降低土壤 pH 并促使 Ca-P 向 Al/Fe-P 转化。因此,在沙地种植樟子松有利于提高沙地土壤难溶性 Ca-P 的利用率。O-P 是与氧化铁稳定结合或被铁氧化物胶膜包裹的磷矿物,为难溶性磷。本研究中人工植被根际土 O-P 含量均低于非根际土,可能是由于根系吸收导致。O-P 可以被植物吸收,但受自然因素和人为因素影响复杂,诸多研究表明,不施肥的土壤中 O-P 含量不断降低^[41-42]。此外,结果显示人工植被根际土 O-P 与 AP 无显著相关性,可见 O-P 可以被植物根系利用,但无法作为 AP 的直接补充 P 源。

土壤 P 在水平方向上迁移缓慢,水平方向上 P 的变化可以反映人工植被对土壤 P 营养的影响范围^[43]。本研究结果显示,小叶杨、长柄扁桃、沙柳和臭柏根际土的多数形态无机磷含量表现为距植株 0 cm 处最高,表明这些人工植被根际土壤 P 可能由外围向树基迁移,以满足其生长需求。樟子松根际 Al-P、Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在距植株 0 cm 处显著低于 20 和 40 cm 处,说明樟子松主要从树基附近土壤中汲取 P,可能会阻碍林下植被的生长。小叶杨根际 Fe-P 在距植株 0 cm 处远低于其他距离,且与 Al-P 表现出“此消彼长”的关系,进一步证实小叶杨促进 Fe-P 转化为其他形态 P,且越靠近植株转化速率越高。

4 结论

毛乌素沙地种植沙柳有利于增加根际土 TP,种

植小叶杨、长柄扁桃和沙蒿可以提高土壤 AP 含量,但多数情况下种植人工植被会加剧土壤 P 库亏缺。沙地 P 以无机态为主,Al-P 转化是根际土速效磷源 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最主要的来源,其次为 Fe-P,种植小叶杨和沙柳有利于增加土壤缓效磷源 Al-P 的含量。综上,在毛乌素沙地种植小叶杨和沙柳有利于改善土壤 P 状况。

参考文献 (References)

- [1] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5—15.
- [2] Zhou Q L, Jiang D M. Soil phosphorus cycling on sandy lands: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 2117—2122. [周全来, 蒋德明. 沙地土壤磷循环研究[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 2117—2122.]
- [3] Liu J, Yang J J. Molecular speciation of phosphorus in agricultural soils: Advances over the last 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 558—567. [刘瑾, 杨建军. 近三十年农田土壤磷分子形态的研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 558—567.]
- [4] Xiang J, Fan L H, Zhang N N, et al. Effects of phosphorus application on soil nutrients and soil microbial community in rhizosphere of *Fargesia* under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9422—9431. [向君, 樊利华, 张楠楠, 等. 施磷对干旱胁迫下箭竹根际土壤养分及微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9422—9431.]
- [5] Wang Z W, Liang X Q. Effects of alternate drying-rewetting process on migration and transformation of soil phosphorus[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(5): 54—58. [王子琬, 梁新强. 土壤干湿交替对磷素释放的影响机制[J]. *环境生态学*, 2020, 2(5): 54—58.]
- [6] Zhang X S. Principles and optimal models for development of Maowusu Sandy grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1994, 18(1): 1—16. [张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式[J]. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 1—16.]
- [7] Pei Y W, Huang L M, Jia X X, et al. Effects of drought stress on the physiological and ecological characteristics of *Amygdalus pedunculata* pall and *Salix psammophila* seedlings in soils with different texture on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 234—239. [裴艳武, 黄来明, 贾小旭, 等. 干旱胁迫对黄土高原不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗生理生态特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 234—239.]
- [8] Ge R L, Siqin B L G, Jin R. Research on the growth characteristics of the introduced *Pinus sylvestris* var. in

- Maowusu sandy land[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18 (5): 159—162. [格日勒, 斯琴毕力格, 金荣. 毛乌素沙地引种樟子松生长特性的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18 (5): 159—162.]
- [9] Zhao X, Xin Y F, Zhang Y L, et al. Effects of different vegetation types on temporal and spatial variation of soil moisture on leeward slope of Mu Us sandy land[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36 (3): 36—43. [赵鑫, 辛一凡, 张应龙, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地背风坡土壤水分时空变化的影响[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36 (3): 36—43.]
- [10] Viñeola B, García-Ruiz R, Liétor J, et al. Soil phosphorus availability and transformation rates in relictic pinsapo fir forests from southern Spain[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 78 (2): 151—172.
- [11] Fu D G, Wu X N, Duan C Q, et al. Response of soil phosphorus fractions and fluxes to different vegetation restoration types in a subtropical mountain ecosystem[J]. *Catena*, 2020, 193: 104663.
- [12] Bouwman A F, Beusen A H W, Billen G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970—2050[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23: GB0A04.
- [13] Li S, Li L, Fan H, et al. Storage and ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus under different ecological restoration patterns in the alpine desertified grassland of northwestern Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (8): 2567—2573. [李森, 李玲, 樊华, 等. 川西北高寒沙地不同生态治理模式下土壤碳氮磷储量及生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (8): 2567—2573.]
- [14] Xue Z Y, Zhou Z Y, Zhan Y Y, et al. Changing characteristics of phosphorus in the rhizosphere soil of the xeromorphic shrubs in arid deserts[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (2): 341—349. [薛梓瑜, 周志宇, 詹媛媛, 等. 干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征[J]. *生态学报*, 2010, 30 (2): 341—349.]
- [15] Zhao Q, Zeng D H, Yu Z Y, et al. Rhizosphere effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on soil phosphorus transformation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (8): 1377—1381. [赵琼, 曾德慧, 于占源, 等. 沙地樟子松人工林土壤磷素转化的根际效应[J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (8): 1377—1381.]
- [16] Li J H, Lu X, Zhou Z Y, et al. Phosphorus contents in the rhizosphere and bulk soil under *Amorpha fruticosa* established in different years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23 (6): 61—68. [李金辉, 卢鑫, 周志宇, 等. 不同种植年限紫穗槐根际非根际土壤磷组分含量特征[J]. *草业学报*, 2014, 23 (6): 61—68.]
- [17] Yu Z, Zhou G Y, Liu L, et al. Natural forests promote phosphorus retention in soil[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28 (4): 1678—1689.
- [18] Pei Y W, Huang L M, Shao M A, et al. Water use pattern and transpiration of Mongolian pine plantations in relation to stand age on northern Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 330: 109320.
- [19] Wu W. Study on process of desertification in Mu Us Sandy Land for last 50 years, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21 (2): 164—169. [吴薇. 近 50 年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究[J]. *中国沙漠*, 2001, 21 (2): 164—169.]
- [20] Duan Y Z, Li J, Du Z Y, et al. Analysis of biodiversity and flora characteristics of natural plants in Mu Us sandy land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38 (4): 770—779. [段义忠, 李娟, 杜忠毓, 等. 毛乌素沙地天然植物多样性组成及区系特征分析[J]. *西北植物学报*, 2018, 38 (4): 770—779.]
- [21] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [22] Bu Y S, Magdoff F R. A comparison of ten methods for determination of available phosphorus in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (1): 140—146. [卜玉山, Magdoff F R. 十种土壤有效磷测定方法的比较[J]. *土壤学报*, 2003, 40 (1): 140—146.]
- [23] Gu Y C, Jiang B F. Determination method of inorganic phosphorus classification in calcareous soil[J]. *Soils*, 1990, 22 (2): 101—102, 110. [顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. *土壤*, 1990, 22 (2): 101—102, 110.]
- [24] Hudek C, Putinica C, Otten W, et al. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73 (1): e13147.
- [25] Weihrauch C, Opp C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 183—194.
- [26] Stewart R E, Hodges S C, Mulvaney M J, et al. Rhizosphere phosphorus solubility and plant uptake as affected by crop in a clay soil from the central Plateau region of Haiti[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45 (5): 703—712.
- [27] Zhao K, Wu Y Y. Rhizosphere calcareous soil P-extraction at the expense of organic carbon from root-exuded organic acids induced by phosphorus deficiency in several plant species[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60 (5): 640—650.
- [28] von Wandruszka R. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility[J]. *Geochemical Transactions*, 2006, 7: 6.
- [29] Liao C R, Li H D, Lv G P, et al. Can ecological restoration improve soil properties and plant growth in

- valley-slope sand dunes on southern Tibetan Plateau?[J]. *Physical Geography*, 2021, 42 (2): 143—159.
- [30] Aerts R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands[J]. *Oecologia*, 1990, 84 (3): 391—397.
- [31] Zhao Y N, Liao C Y, Li X M. Rhizosphere and non-rhizosphere soil biological properties of four kinds of sand-fixing plants in the Mu Us sandland[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32 (4): 680—686. [赵燕娜, 廖超英, 李晓明. 毛乌素沙地 4 种固沙植物根际与非根际土壤生物学特性[J]. 干旱区研究, 2015, 32 (4): 680—686.]
- [32] Yang F, Wang W K, Liu L, et al. Study on the characteristics of *Salix psammophila* roots and soil moisture in Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39 (26): 16050—16052. [杨峰, 王文科, 刘立, 等. 毛乌素沙地沙柳根系与土壤水分特征的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (26): 16050—16052.]
- [33] He H H, Zhang Z K, Su R, et al. Amending aeolian sandy soil in the Mu Us Sandy Land of China with Pisha sandstone and increasing phosphorus supply were more effective than increasing water supply for improving plant growth and phosphorus and nitrogen nutrition of lucerne (*Medicago sativa*) [J]. *Crop and Pasture Science*, 2020, 71 (8): 785—793.
- [34] Chen W, Yang J J, Yuan Y, et al. Effects of artificial sand-fixing vegetation on soil nutrients in Mu Us Sandy Land[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37 (6): 1447—1456. [陈闻, 杨晶晶, 袁媛, 等. 毛乌素沙地人工固沙植被的土壤养分效应[J]. 干旱区研究, 2020, 37 (6): 1447—1456.]
- [35] Liu Z, Wei T X, Zhu Q K, et al. Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils in forests of loess hilly region[J]. *Soils*, 2016, 48 (4): 705—713. [刘钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. 土壤, 2016, 48 (4): 705—713.]
- [36] Stark H, Nothdurft A, Block J, et al. Forest restoration with *Betula* ssp. and *Populus* ssp. nurse crops increases productivity and soil fertility[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 339: 57—70.
- [37] Sukitprapanon T S, Jantamenchai M, Tulaphitak D, et al. Influence of application of organic residues of different biochemical quality on phosphorus fractions in a tropical sandy soil[J]. *Agronomy*, 2021, 11 (2): 248.
- [38] Ryan P R, Delhaize E, Jones D L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, 52: 527—560.
- [39] Andersson K O, Tighe M K, Guppy C N, et al. Incremental acidification reveals phosphorus release dynamics in alkaline vertic soils[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260: 35—44.
- [40] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237 (2): 173—195.
- [41] Wang B R, Xu M G, Wen S L, et al. The effects of long term fertilization on chemical fractions and availability of inorganic phosphate in red soil upland[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2002, 28 (4): 293—297. [王伯仁, 徐明岗, 文石林, 等. 长期施肥对红壤旱地磷组分及磷有效性的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2002, 28 (4): 293—297.]
- [42] Xie L H, Lv J L, Zhang Y P, et al. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (5): 790—794. [谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷[J]. 应用生态学报, 2004, 15 (5): 790—794.]
- [43] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156 (3): 997—1005.

(责任编辑: 卢 萍)