

荒漠绿洲过渡带不同固沙植物根区土壤养分空间分布特征

邓丽媛, 胡广录*, 周 川, 陈海志, 麻 进, 焦 娇

(兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:选取甘肃省临泽县北部的荒漠绿洲过渡带梭梭、泡泡刺、沙拐枣根区的土壤为研究对象,于2020年7—9月采集固沙植物根区不同水平距离处不同土层深度的土壤样品,检测分析土壤样品中的有机质、全N和全P指标。结果表明:1)梭梭根区土壤中各养分含量总体上大于泡泡刺与沙拐枣根区,且梭梭根区土壤中各养分含量的空间变异程度相对沙拐枣、泡泡刺较大。2)固沙植物根区水平距离0~0.5 m处的土壤养分含量大于水平距离1.5~2.0 m处,且梭梭对土壤养分的蓄积作用大于泡泡刺与沙拐枣,说明梭梭可以将大量的自身凋落物和根分泌物等进行有效保蓄,是一种理想的固沙植物。3)随着土层深度的增加,固沙植物根区土壤中有机质含量基本上都呈现出先增高后降低的趋势,全P、全N含量呈现出表层较高的趋势。4)固沙植物根区的土壤有机质、全N、全P之间均呈显著正相关关系。荒漠绿洲过渡带不同固沙植物根区的土壤养分分布特征,决定了过渡带上固沙植被的空间格局,对进一步科学合理的选择固沙植物具有现实意义。

关键词:荒漠绿洲过渡带;固沙植物;土壤养分;空间分布

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0017-07

Spatial Distribution Characteristics of the Soil Nutrients in Root Zones with Different Sand Fixing Plants in the Transition Zone of Desert Oasis

DENG Li-yuan, HU Guang-lu*, ZHOU Chuan, CHEN Hai-zhi, MA Jin, JIAO Jiao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The distribution characteristics of the soil nutrients in the root zones of different sand fixing plants in the desert-oasis ecotone determine the spatial pattern of sand fixing plants in the transition zone, which is of practical significance for the further scientific and reasonable selection of sand fixing plants. Taking the desert-oasis transition zone in the northern Linze County of Gansu Province as the research area, the soils in the root zones of *Haloxylon ammodendron*, *Nitraria sphaerocarpa*, and *Calligonum mongolicum* were selected as the research objects. The soil samples of different root zones of sand fixing plants were collected from July to September 2020. The soil samples collected from different soil depths at horizontal distances were tested and analyzed for the organic matter, total nitrogen and total phosphorus indicators. The results showed that 1) the contents of various nutrients of the soils in the root zone of *H. ammodendron* were generally higher than those of *N. sphaerocarpa* and *C. mongolicum*, and the spatial variability of the nutrient contents in the root zone of *H. ammodendron* was larger than *N. sphaerocarpa* and *C. mongolicum*. 2) The soil nutrient contents at horizontal distance 0—0.5 m in the root zone of sand fixing plants were greater than at 1.5—2.0 m, and the accumulation effect of *H. ammodendron* on soil nutrients was greater than *N. sphaerocarpa* and *C. mongolicum*, indicating that *H. ammodendron* is an ideal sand fixing plant, which can effectively store a large amount of its own litter and root exudates. 3) With the in-

收稿日期:2021-07-25 修回日期:2021-10-26

基金项目:国家自然科学基金(41561102,41867074)。

第一作者:邓丽媛。研究方向:恢复生态学。E-mail:771470227@qq.com

* 通信作者:胡广录,博士,教授。研究方向:生态水文及生态修复。E-mail:hgl0814@163.com

crease of soil depth, the organic matter content in the root zone of sand fixing plants basically increased first and then decreased, and the contents of total phosphorus and total nitrogen showed a trend of higher in surface layer. 4) There was a significantly positive correlation among soil organic matter, total nitrogen, and total phosphorus in the root zone of sand fixing plants.

Key words: desert-oasis ecotone; sand fixing plant; soil nutrient; spatial distribution

固沙植物是荒漠绿洲之间重要的生态屏障,通过降低风沙活动强度来减轻荒漠化对绿洲的威胁,并密切参与了土壤的生物地球化学循环。营造不同的固沙植物可使过渡带上生物多样性增加,其凋落物及根系分泌物向土壤中输入营养物质,能够为微生物的生长和代谢提供基质^[1-2];另外,随着固沙植物的生长,一方面起到了固定沙丘的作用,另一方面日益增长的植物冠幅形成了天然的屏障,有效地减少了太阳辐射,降低了地表温度并减少土壤水分蒸发,从而改善了过渡带土壤的水热状况。然而随着全球温室效应的逐年增强以及黑河中游地区水土资源的过度开发利用,近年来生长在荒漠绿洲过渡带上的天然和人工固沙植物均出现了不同程度的衰退迹象,影响土壤的物理性质及养分的输入和输出,进而影响了土壤的养分储量和养分的有效性等肥力状况,对黑河中游的绿洲生态系统构成了严重威胁。因此,维持荒漠绿洲过渡带固沙植物的正向演替和稳定性已成为社会高度关注的区域性环境问题,而对固沙植物的合理选择,可有效改善荒漠绿洲过渡带植被生态系统的景观格局和演替态势。

土壤可为固沙植物提供必要的物质基础,其养分含量大小影响着固沙植物群落的生长发育及其空间分布格局,而固沙植物也影响着土壤养分的分布。土壤养分相关指标众多,其中,土壤有机质能有效促进土壤生物的活动,进而促进土壤中营养元素的活化,具有保肥性和缓冲性的作用,有机质的降低是梭梭林退化的标志之一^[3];而 N、P 作为土壤中重要的养分,对植物生长、群落组成及固沙植物稳定性亦有重要的影响^[4-7]。有学者研究表明^[8-10],土壤理化性质的分布受到植物和地形的影响,具有梯度性变化规律。也有研究报道,在相同气候和地形条件下,植物类型可影响土壤水分和养分在群落尺度上的空间分布^[11-12]。干旱区降水稀少、气候干旱、植物类型相对简单,土壤养分较为贫瘠,固沙植物生长所需的土壤养分常常受到限制^[13]。为了应对严苛的环境条件,干旱区的固沙植物在有限的土壤养分和水分条件下逐渐演变成斑块状分布的植被空间格局,其生态稳定性对抵御风沙侵袭、保护绿洲安全生产意义重大。学者们以往的研究大多集中在植物类型、生长特点、防沙效应、气候响应以及土壤水分状况等方

面^[14-15],对于干旱区不同固沙植物根区土壤养分含量空间分布对比的研究鲜有报道。本研究在甘肃省临泽县北部的荒漠绿洲过渡带上,以斑块状分布的固沙植物根区土壤为对象,选取土壤有机质、全 N、全 P 作为土壤养分指标,研究固沙植物根区土壤养分含量的空间分布特征,探讨不同固沙植物对土壤养分含量的影响规律,旨在为荒漠绿洲过渡带固沙植物的合理选择、植被恢复及保护重建提供科学支撑,对其他地区荒漠化土地实施植物防治措施亦有重要的借鉴意义。

1 研究区概况

研究区地处黑河中游的甘肃省张掖市临泽县北部的荒漠与绿洲过渡带,地理位置 $39^{\circ}21'53''-39^{\circ}22'01''\text{N}$, $100^{\circ}09'12''-100^{\circ}09'14''\text{E}$,位于巴丹吉林沙漠和张掖—临泽绿洲交汇处,属典型的温带大陆性荒漠气候。海拔 1 370 m 左右,四季云量少,光照充足,年日照时间为 3 045 h;多年平均降水量 117 mm,较多集中于 6—9 月,约占全年降水量的 70%,年蒸发量在 2 390 mm 以上,空气相对湿度为 45%~49%;年均气温 7.6°C ,最低气温 -27.3°C ,最高气温 39.1°C ^[16]。风向以西北风为主,年平均风速 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速 $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ≥ 8 级的大风日数年平均为 15 d。由于长期受到风沙活动的影响,土壤以灰棕色漠土和风沙土为主,以灰棕色漠土为地带性土壤。研究区内天然植物群落结构较为简单,呈斑块状分布,植物种类稀少,主要为灌木与半灌木群落,部分为短期生和 1 年生的草本植物,其余基本上为超旱生植物,因此具有典型荒漠植物的特征^[17]。本研究区代表性固沙植物有梭梭(*Haloxy-lon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)等^[18]。

2 材料与方法

2.1 土样采集

2020 年 7—9 月,对研究区范围内的 3 种不同固沙植物(泡泡刺、沙拐枣、梭梭)根区土壤分别进行采样。选取生长正常、无病虫害、树龄、地形特征等条件基本一致,且与周围其他同种或异种植物互不

影响的 3 种固沙植物各 4 棵。将采样点设置在距离植物根区 0~0.5 m(靠近根部)及 1.5~2.0 m(冠幅边缘)的水平距离处,每一水平距离处对称布设 2 个采样点,每隔 30 d 采样 1 次,共计 144 个采样点,每个采样点处先挖掘土壤剖面,然后按照 20 cm 垂直间距为一土层,采集 0~120 cm 垂直深度范围内不同土层的土壤样品。将采取到的每层土壤样品装入密封袋并分类标记,带回实验室自然风干后,再测试土壤养分含量。

2.2 土壤样品测试方法

根据相关文献资料^[19],将风干后的土壤样品先过 2 mm 筛,充分研磨后再用四分法另取部分样品,过 0.149 mm 筛,混合均匀后装入聚乙烯样品袋,用于测定土壤养分全量。本研究中对于土壤有机质采用邱林法测定,土壤全 N(TN)采用半微量凯式定 N 法测定,土壤全 P(TP)采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定。

2.3 数据处理与分析

对试验测定所得的 3 种不同固沙植物根区的土壤有机质、全 N、全 P 指标数据进行统计分析,可得出 3 种不同固沙植物根区土壤养分含量的差异。为进一步探讨固沙植物根区不同深度土壤养分含量,以及相同固沙植物根区不同水平距离处(根区 0~0.5 m 及 1.5~2.0 m)土壤养分含量的分布规律和特点,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)进行比较,并且用 Origin 绘制相关图件。

3 结果与分析

3.1 固沙植物根区 0~120 cm 土层深度土壤养分总体特征

由表 1 可见,不同固沙植物根区 0~0.5 m 处土壤有机质含量的平均值为梭梭(21.78 g·kg⁻¹)>泡泡刺(20.67 g·kg⁻¹)>沙拐枣(19.06 g·

kg⁻¹),全 P 含量的平均值为梭梭(0.41 g·kg⁻¹)>泡泡刺(0.40 g·kg⁻¹)=沙拐枣(0.40 g·kg⁻¹),全 N 含量的平均值为梭梭(0.21 g·kg⁻¹)>泡泡刺(0.20 g·kg⁻¹)=沙拐枣(0.20 g·kg⁻¹)。由表 2 可见,不同固沙植物根区 1.5~2.0 m 处土壤有机质含量的平均值为泡泡刺(18.44 g·kg⁻¹)>梭梭(17.39 g·kg⁻¹)>沙拐枣(16.94 g·kg⁻¹),全 P 含量的平均值为梭梭(0.38 g·kg⁻¹)=泡泡刺(0.38 g·kg⁻¹)>沙拐枣(0.37 g·kg⁻¹),全 N 含量的平均值为梭梭(0.20 g·kg⁻¹)>沙拐枣(0.19 g·kg⁻¹)=泡泡刺(0.19 g·kg⁻¹)。由表 1、表 2 还可以看出,不同固沙植物根区 0~0.5 m 及 1.5~2.0 m 处各土层之间土壤有机质变异系数相对较大,高于 9.9%,而土壤全 P 和全 N 的变异系数均相对较小,全 N 含量变异范围在 3.66%~6.14%,全 P 含量变异范围在 4.80%~6.86%。

上述结果说明,梭梭根区土壤中养分含量相对较多,并且 3 种不同固沙植物根区土壤有机质含量时空变异程度较大,而土壤全 P、全 N 含量时空变异程度较小。

3.2 固沙植物根区不同水平距离处土壤养分含量变化

为了揭示固沙植物根区不同水平距离处各土层的土壤养分含量变化特点,对土壤有机质、全 N、全 P 在固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处与 1.5~2.0 m 处各土层之间的差异性进行比较。由图 1 可见,梭梭、沙拐枣、泡泡刺根区土壤有机质、全 N、全 P 含量在不同水平距离间均存在差异性,具体表现为根区水平距离 0~0.5 m 处>1.5~2.0 m 处,并且随着土层深度增加,根区水平距离 0~0.5 m 处与 1.5~2.0 m 处各土层的差异性亦逐渐降低,即 3 种不同固沙植物根区水平距离 0~2 m 范围内浅层土壤中的养分含量靠近根部较高,存在较明显的“肥岛”效应。

表 1 不同固沙植物根区 0~0.5 m 处 0~120 cm 土层深度土壤养分总体特征

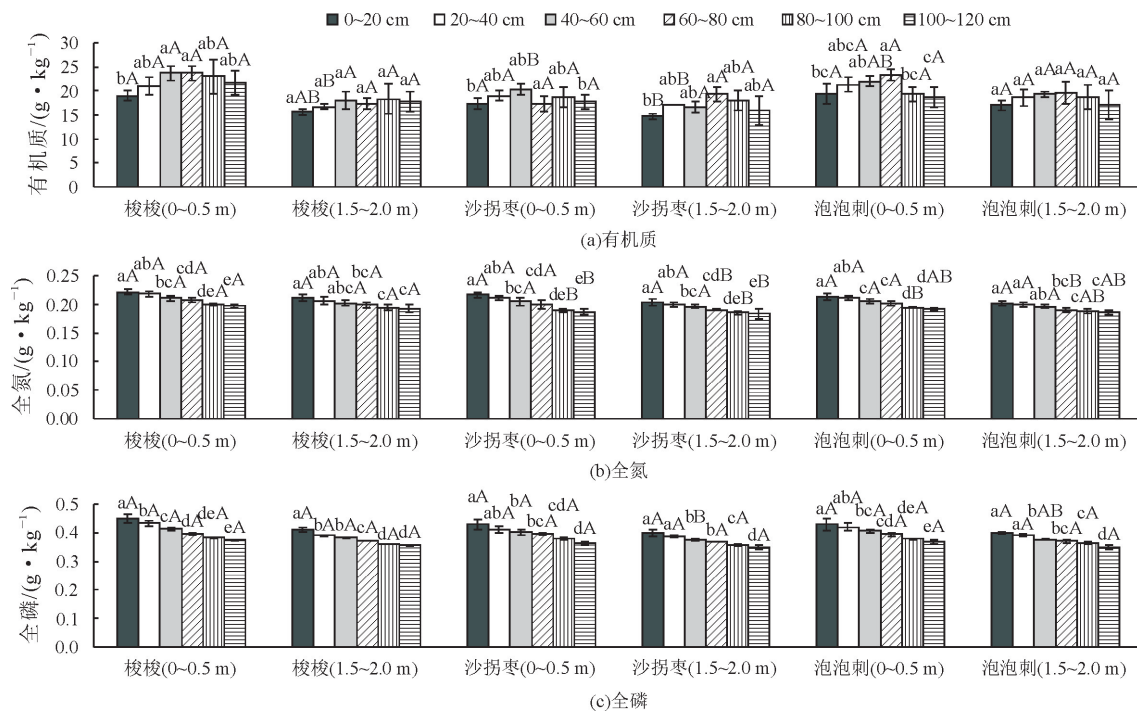
Table 1 General characteristics of the soil nutrients in 0—120 cm soil layer at horizontal distance 0—0.5 m in the root zone of different sand fixing plants

不同固沙植物	养分 /(g·kg ⁻¹)	最大值 /(g·kg ⁻¹)	最小值 /(g·kg ⁻¹)	平均值 /(g·kg ⁻¹)	标准差 /(g·kg ⁻¹)	土层间变异系数 (%)
梭梭	有机质	26.00	18.00	21.78	2.53	11.62
	全 N	0.23	0.20	0.21	0.01	4.64
	全 P	0.46	0.37	0.41	0.03	6.86
沙拐枣	有机质	23.00	16.00	19.06	1.89	9.92
	全 N	0.22	0.18	0.20	0.01	6.14
	全 P	0.44	0.36	0.40	0.02	5.79
泡泡刺	有机质	24.00	17.00	20.67	2.20	10.64
	全 N	0.22	0.19	0.20	0.01	4.34
	全 P	0.45	0.36	0.40	0.02	6.02

表 2 不同固沙植物根区 1.5~2.0 m 处 0~120 cm 土层深度土壤养分总体特征

Table 2 General characteristics of soil nutrients in 0~120 cm soil layer at 1.5~2.0 m in the root zone of different sand fixing plants

不同固沙植物	养分 $/(g \cdot kg^{-1})$	最大值 $/(g \cdot kg^{-1})$	最小值 $/(g \cdot kg^{-1})$	平均值 $/(g \cdot kg^{-1})$	标准差 $/(g \cdot kg^{-1})$	土层间变异系数 (%)
梭梭	有机质	21.00	15.00	17.39	1.79	10.29
	全 N	0.22	0.19	0.20	0.01	4.13
	全 P	0.42	0.35	0.38	0.02	5.01
沙拐枣	有机质	21.00	13.00	16.94	2.07	12.22
	全 N	0.21	0.18	0.19	0.01	4.09
	全 P	0.41	0.35	0.37	0.02	4.83
泡泡刺	有机质	21.00	14.00	18.44	1.98	10.74
	全 N	0.21	0.18	0.19	0.01	3.66
	全 P	0.40	0.34	0.38	0.02	4.80



注:小写字母表示同一植物不同土层间差异显著,大写字母表示不同植物同一土层间差异显著。

图 1 不同固沙植物根区 0~0.5 m 处与 1.5~2.0 m 处土壤养分含量的差异性

Fig. 1 Soil nutrient contents at 0~0.5 m and 1.5~2.0 m of root zone of different sand fixing plants

3.3 固沙植物根区不同土层土壤养分含量变化

3.3.1 有机质 由图 1 可知,梭梭根区水平距离 0~0.5 m 处土壤有机质含量在不同土层间差异显著,具体表现为 40~80 cm 土层>80~100 cm 土层>20~40 cm 土层>100~120 cm>0~20 cm 土层;沙拐枣根区水平距离 0~0.5 m 处土壤有机质含量在不同土层间差异显著,具体表现为 60~80 cm 土层>40~60 cm 土层与 20~40 cm 土层>80~100 cm 土层与 0~20 cm 土层>100~120 cm 土层;泡泡刺根区水平距离 0~0.5 m 处土壤有机质含量在不同土层间差异显著,具体表现为 60~80 cm 土层>20~60 cm 土层>0~20 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层。3 种固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处土壤有机质含量整体呈现出随着土层深度增加先升高再降低的变化趋势。

梭梭和泡泡刺根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤有机质含量在不同土层间差异不显著;沙拐枣根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤有机质含量在不同土层间差异显著,具体表现为 60~80 cm 土层>20~60 cm 土层与 80~100 cm 土层>0~20 cm 土层与 100~120 cm 土层。3 种固沙植物根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤有机质含量整体上呈现出随着土层深度增加先升高再降低的变化趋势。

综上所述,3 种不同固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处,0~40、60~80 cm 土层土壤有机质含量差异不显著;40~60 cm 土层土壤有机质含量差异显著,具体表现为梭梭>泡泡刺>沙拐枣;80~120 cm 土层土壤有机质含量差异显著,具体表现为梭梭>沙拐枣>泡泡刺。3 种不同植物根区水平距离 1.5~2.0 m 处,0~20、40~60 cm 土层土壤有机质

含量差异显著,具体表现为泡泡刺>梭梭>沙拐枣;20~40 cm 土层土壤有机质含量差异显著,具体表现为泡泡刺>梭梭=沙拐枣;60~120 cm 土层土壤有机质含量差异不显著。

3.3.2 全 N 由图 1 可知,梭梭根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 N 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层;沙拐枣根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 N 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层;泡泡刺根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 N 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层。3 种固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 N 含量整体呈现出随着土层深度增加而下降的变化趋势。

梭梭根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 N 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~120 cm 土层;沙拐枣根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 N 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层;泡泡刺根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 N 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~120 cm 土层。3 种固沙植物根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 N 含量整体上呈现出随着土层深度增加而下降的变化趋势。

综上所述,3 种不同固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处,0~80 cm 土层土壤全 N 含量差异不显著;80~120 cm 土层土壤全 N 含量差异显著,具体表现为梭梭>沙拐枣>泡泡刺。3 种不同固沙植物根区 1.5~2.0 m 处,0~60 cm 土层土壤全 N 含量差异不显著;60~120 cm 土层土壤全 N 含量差异显著,具体表现为梭梭>沙拐枣>泡泡刺。

3.3.3 全 P 由图 1 可知,梭梭根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 P 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm>80~120 cm 土层;沙拐枣根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 P 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm>80~120 cm 土层;泡泡刺根区水平距离 0~0.5 m

处土壤全 P 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层。3 种固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处土壤全 P 含量整体呈现出随着土层深度增加而下降的变化趋势。

梭梭根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 P 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~120 cm 土层;沙拐枣根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 P 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~120 cm 土层;泡泡刺根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 P 含量在不同土层间差异显著,具体表现为 0~40 cm 土层>40~60 cm 土层>60~80 cm 土层>80~100 cm 土层>100~120 cm 土层。3 种固沙植物根区水平距离 1.5~2.0 m 处土壤全 P 含量整体上呈现出随着土层深度增加而下降的变化趋势。

综上所述,3 种不同固沙植物根区水平距离 0~0.5 m 处,0~120 cm 土层土壤全 P 含量差异不显著。3 种不同植物根区水平距离 1.5~2.0 m 处,0~40、60~120 cm 土层土壤全 P 含量差异不显著;40~60 cm 土层土壤全 P 含量差异显著,具体表现为梭梭>泡泡刺>沙拐枣。

3.4 不同固沙植物土壤养分间的相关性

将 3 种不同植物类型和 0~120 cm 各土层深度及其土壤有机质、全 N、全 P 指标数据进行相关性分析(表 3),不同固沙植物与土壤各养分之间均呈正相关关系,其中与有机质、全 P 呈极显著正相关($P<0.01$)。不同土层深度与全 N、全 P 呈极显著负相关($P<0.01$),这表明 3 种固沙植物根区 0~2.0 m 处土壤全 N、全 P 含量随着土层深度增加而下降。

土壤有机质、全 N、全 P 之间均呈正相关关系,其中有机质与全 N 呈极显著正相关($P<0.01$),并且全 N 与全 P 呈极显著正相关($P<0.01$)。这表明,固沙植物根区土壤不同养分之间存在一定的相互影响,可为该地区固沙植物选择及其根区土壤养分的深入研究提供必要参考。

4 结论与讨论

土壤养分含量与植物类型、气候、降水、土壤质地、地形地貌以及人类活动等有较强的相关关系^[5,20-21]。在本研究区气象和水文条件基本一致的情况下,固沙植物的不同类型成为影响土壤养分的

表 3 固沙植物类型、土层深度、土壤养分间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between nutrients and different vegetation types and different soil depths

指标	植物类型	土层深度	有机质	全 N	全 P
有机质	0.460 **	0.099	1		
全 N	0.230 *	-0.759 **	0.249 **	1	
全 P	0.402 **	-0.793 **	0.200 *	0.904 **	1

注: ** 表示置信度在($P < 0.01$)水平(双侧)上极显著相关; * 表示置信度在($P < 0.05$)水平(双侧)上显著相关。

重要因素。研究结果表明,不同类型的固沙植物根区土壤养分空间分布呈现差异性,整体上梭梭根区土壤养分含量大于泡泡刺与沙拐枣根区。土壤中的有机质和全 N 主要来源于植物根分泌物及凋落物的分解^[5,22];土壤 P 是一种沉积性元素,主要源于岩石分化,受气候及成土母质等因素的影响较大^[23]。研究区内 3 种不同固沙植物根区土壤养分指标中,土壤有机质含量空间变异程度相对较大,其中沙拐枣根区水平距离 1.5~2.0 m 处变化最大;土壤全 P、全 N 含量空间变异程度相对较小,其中泡泡刺根区水平距离 1.5~2.0 m 处变化最小。这可能与固沙植物的冠幅和根系分布特点有关,梭梭冠幅较大,枝叶较为茂密,凋落物相对比较多,从风沙中蓄积到的土壤养分较多,大部分凋落物分解进入土壤,且其主根系发达,根系分泌物较多,使得根区土壤养分含量较高;而枝条较为稀疏并且冠幅较小的泡泡刺和沙拐枣凋落物相对较少,从风沙中蓄积到的土壤养分较少,且其侧根系虽较为发达,但主根系相对于梭梭不发达,从而使得植物根区范围的土壤养分含量相对于梭梭较少。此外,泡泡刺沙包是大沙鼠和沙漠蜥蜴的重要栖息地,他们的粪便和残体会带来部分土壤养分^[24],但由于其影响程度相对较小且范围较为随机,可忽略不计。

不同固沙植物根区土壤养分在水平分布上也表现出一定程度的规律性,总体表现为根区水平距离 0~0.5 m 处各土层土壤养分含量大于根区水平距离 1.5~2.0 m,这与苟博文等^[25]、曹艳峰等^[26]、孙特生等^[27]的研究结果相一致。说明根区水平距离 0~0.5 m 处各土层土壤更容易积累较高的养分,这是由于植物的防风固沙作用,有效防止表层土壤养分风蚀损耗,同时将植物自身凋落物和植物根分泌物等进行保蓄,将其保存在植物根部附近,从而使根区水平距离 0~0.5 m 处土壤养分含量大于 1.5~2.0 m 处,这种现象称为“肥岛效应”^[28-29]。研究发现,3 种不同固沙植物根区的土壤虽然均呈现一定程度上的“肥岛效应”,但梭梭的“肥岛效应”要大于沙拐枣和泡泡刺,且随着土层深度的增加,植物的这种蓄积效应逐渐降低,这是由于梭梭具有较发达的主根系,以根际沉积的方式将输入到根部的有

机、无机化合物释放到周围土壤中,其较大的冠幅也大大减弱了风蚀带来的养分损耗,从而使根区水平距离 0~0.5 m 处土壤养分大于 1.5~2.0 m 处。“肥岛效应”改善了固沙植物根区的土壤和生态条件,有利于提高植物在风沙干旱环境中的生存能力^[26]。固沙植物的生长发育和良性演替可减少土壤风蚀,从而改善区域生态环境。荒漠绿洲过渡带固沙植物根区土壤虽具有“肥岛效应”,并且能从多种途径中获取植物生长所需的养分,但其土壤中有有机质、全 P、全 N 含量仍极其贫乏,应加强林地固沙植物的抚育和保护。

不同固沙植物对土壤养分含量的影响,不仅在土层表面(0~20 cm),还深入到更深的土层中^[10]。在本研究中,尽管整体上土层深度对土壤养分含量具有显著影响,但不同固沙植物的土层深度对土壤养分含量的影响呈现一定的差异。固沙植物根区土壤中有有机质、全 P、全 N 含量随着土层深度的变化较大,可能与固沙植物枯落物的分解、植物树冠的大小以及植物根区土壤形成的沙包等因素有关。表层土壤中凋落物相对较多,且在灌丛下的聚集会使小部分养分随径流与雨水渗透到下层土壤中,使得有机质含量随着土层深度的增加基本上都呈现出先增大后降低的趋势,且表层(0~20 cm)含量大于底层(100~120 cm);土壤全 P、全 N 含量则呈现出表层养分较高的趋势,这与陈婧等^[30]的研究结果一致,土壤全 P、全 N 来源于动植物残体的归还量和生物固 N,且植物根系随土壤深度的增加而呈减少趋势^[31],所以表层动植物残体丰富,土壤全 P、全 N 含量相对较高^[32]。

固沙植物根区土壤养分指标之间也存在一定的相关性。本研究表明,固沙植物根区土壤有机质、全 N、全 P 之间均呈正相关关系,其中土壤有机质与全 N 呈极显著正相关,并且全 N 与全 P 呈极显著正相关。土壤养分之间的相互影响关系,可为该区域固沙植物的合理配置及其土壤养分的进一步深入研究提供参考。

综上所述,梭梭根区范围的土壤养分高于沙拐枣和泡泡刺根区,且梭梭的“肥岛效应”大于沙拐枣和泡泡刺。因此,应大力推广梭梭作为荒漠绿洲过

渡带固沙植物,同时加强固沙植物的抚育更新,维持其生态稳定性及其正向演替。

参考文献:

- [1] MEGLIOLI P A, ARANIBAR J N, VILLAGRA P E, *et al.* Spatial patterns of soil resources under different land use in *Prosopis woodlands* of the Monte desert[J]. *Catena*, 2017, 149:86-97.
- [2] 解婷婷,苏培玺,周紫鹃,等. 荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性及其与土壤理化因子的关系[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2):508-514.
- [3] 刘江,张立欣,徐先英. 不同退化程度的人工梭梭林地土壤理化特征[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(4):36-42.
LIU J, ZHANG L X, XU X Y. Soil physicochemical properties of artificial *Haloxyylon ammodendron* forest with different degradation degrees[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(4):36-42. (in Chinese)
- [4] 李云飞,马晓俊,李小军. 固沙植被演替过程中藓类结皮及其表层土壤理化性质变化[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2020, 56(4):463-470.
- [5] 陶冶,吴甘霖,刘耀斌,等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(2):305-314.
- [6] WEN J W, LING Q, YUAN G Z, *et al.* Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch(*Larix gmelinii*) plantations in China[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(8):2657-2676.
- [7] JULIETTE M. G. B, RICHARD D. B. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(3):193-204.
- [8] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等. 不同恢复类型植物细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(11):3979-3987.
- [9] 王建栋,张志华,杨喜田,等. 黑河流域土壤理化性质分布特征[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(1):133-139.
- [10] 钱亦兵,吴兆宁,常铁深,等. 艾比湖地区植被和土壤在南-北区段上的差异性分析[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(5):781-789.
- [11] GEFEI Z, LIWEN Z, QIYUE Y, *et al.* Effect of desert shrubs on fine-scale spatial patterns of understory vegetation in a dry-land[J]. *Plant Ecology*, 2016, 217(9):1141-1155.
- [12] 李泽霞,董彦丽,马涛. 黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3):43-49.
- [13] 刘子金,徐钰德,朱兴林,等. 干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化风险综合评估与演变分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1):367-379.
- [14] 王彦武,欧阳雪芝,罗玲,等. 民勤绿洲区固沙林土壤理化性质时空变异分析[J]. *人民黄河*, 2017, 39(2):85-89.
- [15] 黄雅茹,郝玉光,董礼隆,等. 乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(2):1-9.
HUANG Y R, HAO Y G, DONG L L, *et al.* Comparative study on soil chemical properties of typical sand-fixing forests in Ulanbuh Desert[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(2):1-9. (in Chinese)
- [16] 巩炜,胡广录,付鹏程,等. 干旱区沙漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5):200-208.
- [17] 张克海,胡广录,方桥,等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带固沙植物根区土壤含水量[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(3):33-42.
- [18] 张克海,胡广录,张钰佳,等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)根区土壤含水量分布特征及影响因素[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(4):16-25.
ZHANG K H, HU G L, ZHANG Y J, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil water content in the root zone of *Haloxyylon ammodendron* in desert-oasis ecotone in the middle reaches of the Heihe River[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(4):16-25. (in Chinese)
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:42-49, 76-78.
- [20] ZHANG K, SU Y Z, YANG R. Variation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and biogeo-graphic factors across the desert ecosystem of Hexi Corridor, northwestern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19:49-57.
- [21] 李浙华,李生字,李丙文,等. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1):160-167.
- [22] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, *et al.* Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3):139-151.
- [23] 张珂,苏永中,王婷,等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(11):3235-3243.
- [24] 罗维成,赵文智,任珩,等. 不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2):191-199.
- [25] 苟博文,魏博,马松梅,等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭根区土壤养分的分布特征研究[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(6):1229-1234.
- [26] 曹艳峰,丁俊祥,于亚军,等. 不同质地土壤中荒漠灌木梭梭“肥岛”的初步探讨[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1):261-270.
- [27] 孙特生,李文彦,刘继亮. 黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(5):179-185.
- [28] 刘学东,陈林,杨新国,等. 荒漠草原2种柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛土壤养分“肥岛”效应[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4):26-32.
LIU X D, CHEN L, YANG X G, *et al.* “Fertile Island” effect of soil nutrients occurring in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* shrubs in desert steppe[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4):26-32. (in Chinese)
- [29] JAMES F, REYNOLDS, ROSS A, *et al.* Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development[J]. *Ecological Monographs*, 1999, 69(1):69-106.
- [30] 陈婧,崔向新,丁延龙,等. 基于“肥岛”效应探讨人工梭梭土壤养分时空演变趋势[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6):71-79.
- [31] 党晓宏,高永,虞毅,等. 库布齐沙漠北缘8种荒漠灌丛生物量预测模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5):168-174.
- [32] 张平究,潘根兴. 不同植被群落下喀斯特土壤养分及生物化学性质特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1):77-80.