

# 风沙土整治区不同林地覆被对土壤特性的影响

张露, 魏静, 孙增慧, 范鸿建

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 710075, 西安; 2. 陕西地建土地工程技术研究院, 710075, 西安;  
3. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 710075, 西安; 4. 陕西省土地整治工程技术研究中心, 710075, 西安;  
5. 自然资源部土地工程技术创新中心, 710075, 西安)

**摘要:** 为了了解风沙土整治区不同林地覆被下的土壤特性, 为沙地整治后的林木选种提供决策依据, 在砒砂岩整治风沙土的工程项目中, 按整治后 5、10 和 15 a 的年限分别采集表层 (0~20 cm) 土样, 测定其土壤密度、含水量、有机质和碳酸钙。结果表明, 在风沙土整治区, 不同林地下土壤密度和碳酸钙的大小为: 天然荒草地 > 柠条 > 沙棘, 其中, 沙棘的土壤密度比柠条小 3.10%, 比荒草地小 10.04%; 沙棘的土壤碳酸钙质量分数比柠条小 13.82%, 比荒草地小 37.66%。不同林地下土壤含水量和有机质质量分数大小为: 沙棘 > 柠条 > 天然荒草地。其中, 沙棘的土壤含水量比柠条大 21.71%, 比荒草地大 96.68%; 沙棘的土壤有机质质量分数比柠条大 9.48%, 比荒草地的大 55.64%。随着整治后林木种植年限的增加, 其土壤密度和有机质质量分数均增加, 土壤含水量以整治后 10 a 的最大, 而土壤碳酸钙质量分数随整治年限的增加而降低。综上, 林木的种植对砒砂岩整治风沙土后的土壤结构状况有所改善, 其中又以种植沙棘为宜。

**关键词:** 砒砂岩; 风沙土; 柠条; 沙棘; 含水量; 有机质; 碳酸钙

**中图分类号:** S158.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2023)04-0046-07

**DOI:** 10.16843/j.sswc.2023.04.006

## Effects of different forest covers on soil properties in an aeolian sandy soil improvement area

ZHANG Lu, WEI Jing, SUN Zenghui, FAN Hongjian

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., 710075, Xi'an, China; 2. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., 710075, Xi'an, China; 3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, 710075, Xi'an, China; 4. Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, 710075, Xi'an, China; 5. Land Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, 710075, Xi'an, China)

**Abstract:** [ **Background** ] Land desertification has always been a major ecological and environmental problem troubling local people's production and life in the wind-sand and grassy flat area in northern Shaanxi province. How to select trees scientifically after the reasonable mixing of local soft sandstone and aeolian sand soil into soil is still a scientific problem that needs to be further solved. To understand the soil characteristics under different forest cover in the aeolian sand soil remediation area provides the decision basis for tree planting optimization, and has important practical significance for the management and ecological environment restoration of Mu Us Sandy Land. [ **Methods** ] In this study, in the soft sandstone remediation project area of aeolian sand soil in Mengjiawan village, Yulin city, Shaanxi province, the forest soil of *Caragana korshinskii* and sea buckthorn of different years with the same

收稿日期: 2022-03-22 修回日期: 2023-03-10

项目名称: 陕西省技术创新引导专项“砒砂岩与沙复配成土造田关键技术成果转化及示范推广”(2021CGBX-03)

第一作者简介: 张露(1987—), 女, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 土壤物理及其改良。E-mail: luluqiaofeng@126.com

topography, geomorphology and site conditions was selected as the research object, and the natural grassland was taken as the reference. Using the method of time generation and space, topsoil samples (0–20 cm) were collected in 5, 10 and 15 years from the forest lands of the first phase (2007), second phase (2012) and third phase (2017), respectively, to measure the soil density, water content, organic matter and calcium carbonate. [ **Results** ] In the aeolian sandy soil area, the soil bulk density and soil calcium carbonate size of different woodlands were as follows: natural barren grassland > *C. korshinskii* > *Hippophae rhamnoides*, among which, the soil bulk density of *H. rhamnoides* was 3.10% lower than that of *C. korshinskii*, and 10.04% lower than that of the natural barren grassland. The soil calcium carbonate content of the soil was 13.82% lower than that of *C. korshinskii*, and 37.66% lower than that of barren grassland. The soil moisture content and soil organic matter of different woodlands were as follows: *H. rhamnoides* > *C. korshinskii* > natural barren grassland, among which, the soil moisture content of *H. rhamnoides* was 21.71% higher than that of *C. korshinskii*, and 96.68% was relatively larger than that of barren grassland. The soil organic matter content of *H. rhamnoides* was relatively 9.48% were larger than *C. korshinskii*, and 55.64% were larger than barren grassland. With the increase of planting years after remediation, the soil bulk density and soil organic matter content of different woodlands increased, the soil moisture content was the largest in 10 years of remediation, while the soil calcium carbonate content decreased with the increase of remediation years. [ **Conclusions** ] To sum up, through the experimental results of soil characteristics of different forest lands, the problem of tree seed selection after land consolidation in the wind-sand and grass-flat area of northern Shaanxi was solved. The planting of trees has improved the soil structure after the use of feldspathic sandstone to remediate the aeolian sandy soil, among which the planting of *H. rhamnoides* is suitable.

**Keywords:** feldspathic sandstone; aeolian sandy soil; *Caragana korshinskii*; *Hippophae rhamnoides*; moisture content; organic matter; calcium carbonate

中国是世界上荒漠化面积最大、受风沙危害最严重的国家之一。全国荒漠化土地面积 261.16 万 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的 27.20%; 沙化土地面积 172.12 万 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的 17.93%。陕北风沙草滩区, 植被稀疏, 生态环境脆弱, 起风起沙天气与植物的生长季节不一致, 固沙防风林建设体系不完备, 水土流失严重, 这对当地生产生活造成极大影响, 同时也严重制约着当地生态环境建设。土地沙化势必会引起植被的改变, 反之, 植被的变化也会促进土壤的演变<sup>[1-2]</sup>。

有研究表明在陕北风沙草滩区广泛分布着风沙土和砒砂岩, 二者对农业生产及生态环境的危害极大, 在当地并称为“两害”<sup>[3]</sup>。风沙土透水漏肥; 砒砂岩的成岩程度及结构强度都较低, 易风化, 颗粒间胶结性、渗透性差, 但具有较好的水分保持能力, 其岩层能储存一定的水分, 成为相对富水层<sup>[4-5]</sup>。有研究就指出, 可以利用风沙土和砒砂岩的特性互补, 将二者进行合理复配结合成土, 这样既有利于当地生态环境问题的解决, 又能提高土地生产力, 增加经济效益<sup>[6]</sup>。但由于复配土壤作为一种新型土壤, 其

特性如何, 怎样科学选种林木仍然是需要进一步解决的科学问题。

刘举等<sup>[7]</sup>在黄土高原区对不同林地的土壤肥力进行研究表明, 种植林木能提高土壤的肥力, 但缺少不同年限间的纵向对比。也有研究针对风沙区沙棘的种植是否能提高土壤理化性质进行论证<sup>[8-9]</sup>, 但缺少不同林木间的横向比较。早在 20 世纪 90 年代, 陕北风沙区就采用生态退耕造林等措施对毛乌素沙地进行了集中整治, 此后也呈现出较好的效果, 使土地沙化情况得到一定程度的改善<sup>[10-11]</sup>。但是, 陕北风沙土区的整体生态环境依然比较脆弱<sup>[12]</sup>, 因此, 针对上述问题, 通过研究不同整治年限下不同林地的土壤特性, 为优选林木种植提供决策依据, 对毛乌素沙地治理及生态环境恢复有着重要的现实意义。

1 研究区概况

研究区位于陕西榆林市榆阳区西北部, 距榆林市区 35 km 的孟家湾乡孟家湾村, E 109°34'28" ~ 109°38'36"、N 38°36'48" ~ 38°40'18" (图 1), 位于毛

乌素沙地的东沿。海拔 870 ~ 1 405 m, 区域多年平均降雨量 413.9 mm, 年平均气温 8.1 ℃, 极端最高气温 38.6 ℃, 极端最低气温为 -32.7 ℃, 年日照时间 2 754 h, 年总辐射量  $1.37 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$ , 多年平均无霜期 155 d,  $\geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$  年时间为 250 d 左右。土层的最大冻土深度为 148 cm。项目区内水土流失面积近 97%, 土壤侵蚀模数  $4\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 为典型

的风沙草滩区。气候类型为温带大陆性半干旱季风气候, 具有典型的干旱半干旱气候特征。植物建群种由典型的旱生和广旱生植物组成, 主要植被类型为沙蒿半灌丛, 另有稀少的沙柳 (*Salix cheilophila*) 和长芒草 (*Stipa bungeana*)、针茅 (*Stipa capillata*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*) 等植被, 覆盖率不足 7%。

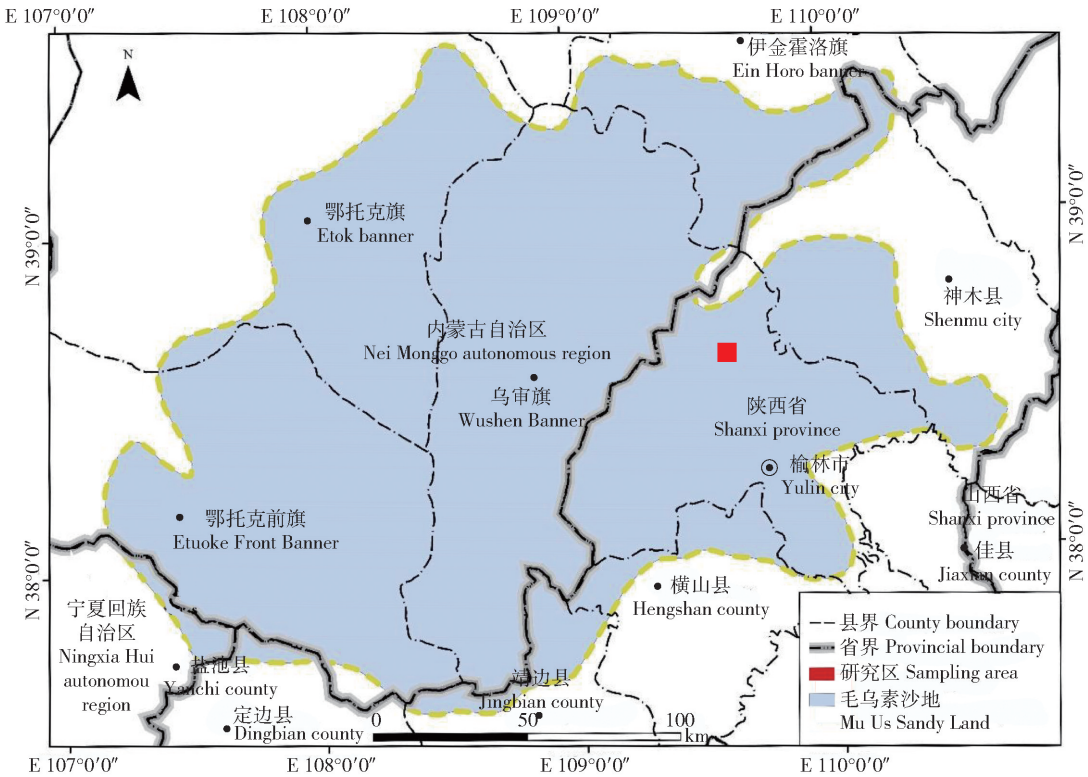


图 1 研究区域  
Fig.1 Study area

2 材料与方法

2.1 土地整治方式

项目区在整治前,除有极少林地外,其余均为荒草地,天然植被覆盖率仅为 2%<sup>[13]</sup>。自 2005 年开始,陕西省土地整治工程技术研究中心通过利用砒砂岩与风沙土复配的方式,对榆林毛乌素沙地进行整治,为提高风沙土区植被覆盖率提供土壤条件与建设基础。工程措施首先是移动土方来平整土地,为达到改善风沙土结构、增加风沙土肥力的目的,而后的覆土工程主要采用外购客土(砒砂岩)对风沙土进行覆盖,覆土厚度为 9 cm。整治项目共分为 3 期,分别于 2007,2012 和 2017 年竣工,竣工后的土地用作农田防护林,利用方式主要为林地,种植柠条和沙棘。笔者主要针对风沙土整治区种植不同林木后的土壤特性进行研究。

2.2 研究方法

2.2.1 样地选择 笔者选取地形、地貌和立地条件一致的不同年限的柠条 (*Caragana korshinskii*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 林地土壤作为研究对象,并以天然荒草地为参考。为最小化土壤空间异质性因子,采用时间代空间的方法,在项目整治竣工区域 1 期(2007)、2 期(2012)和 3 期(2017)的林地中分别选取 15、10 和 5 年生的柠条和沙棘样地共计 6 块,以及每期区域内选择坡位、坡度大致一致的荒草地各 1 块,共计 3 块。每块地样方的实验对象单一,没有其他物种影响,除去边界效应,每块样方面积为 30 m × 30 m。其中,柠条的种植采用条播,行距在 2 ~ 2.5 m,株距在 0.5 ~ 0.8 m,种子埋深为 2 ~ 4 cm,播种量为 18 ~ 25 kg/hm<sup>2</sup>,由于柠条幼苗的生长非常缓慢,一旦播种后,应立即封锁种植区域,防止被牛羊等动物破坏。当地沙棘

采用扦插育苗种植,将选好的插条插入到整治好的土壤,插入深度为插条1/3左右,用手轻拍后灌足水,行距1.5~2 m,株距1~1.5 m。3期的柠条和沙棘长势良好,实验条件成熟。

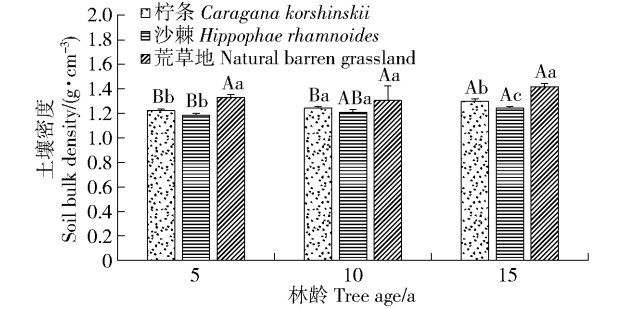
2.2.2 土壤采集与测定 在每个样地内,于2021年4月底在距树根部20~25 cm处以“S”法用取土钻采集表层(0~20 cm)土样5个,5点一混合,用以测定土壤有机质和碳酸钙。土壤含水量和土壤密度的测定另采集原状土进行。所有指标的测定均进行3次重复。土壤密度测定采用环刀法,土壤含水量测定采用烘干法,土壤有机质测定采用油浴加热-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>容量法,土壤碳酸钙测定采用气量法。

数据整理及作图采用 Microsoft Excel 2016 进行,数据结果为平均值±标准偏差(*n* = 3)。统计分析采用 SPSS Statistics 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)和 Duncan 新复极差法检验。

3 结果与分析

3.1 对土壤密度的影响

如图2所示,不同种植年限下不同林地的土壤密度变化情况。随着种植年限的增加,风沙土整治区的土壤密度略有增加。从多年平均结果来看,不同林地的土壤密度大小表现为天然荒草地>柠条>沙棘。种植5 a沙棘土壤密度比柠条小2.72%;种植10 a沙棘土壤密度为1.21 g/cm<sup>3</sup>,比柠条小2.42%;种植15 a沙棘土壤密度为1.24 g/cm<sup>3</sup>,比柠条小4.11%。可见,随着时间的推移,天然荒草地的土壤密度变化并不显著(*P* < 0.05),平均值为1.35 g/cm<sup>3</sup>,比5 a的沙棘大13.45%,比10 a的沙棘大11.57%,比15 a的沙棘大8.58%。但在风沙土整治10 a后,不同林地和荒草地的土壤密度差异



不同大写字母表示不同林龄,不同小写字母表示不同林地,下同。Different capital letters indicate different forest ages, and different lowercase letters indicate different forest land, the same below.

图2 不同年限不同林地覆被下土壤密度变化  
Fig.2 Soil bulk density changes in different years and different woodland covers

不显著(*P* < 0.05)。

3.2 对土壤含水量的影响

图3是不同种植年限下不同林地的土壤含水量的变化情况。有林地比荒草地的土壤含水量高,表现为沙棘>柠条>天然荒草地。从多年平均结果来看,种植柠条的土壤含水量比天然荒草地大61.84%,种植沙棘时,土壤含水量比天然荒草地大96.98%,可见,沙棘的种植能使沙地的土壤含水率提高近一倍。在不同年限下,沙棘的土壤含水量差异性不显著(*P* < 0.05)。柠条和沙棘的土壤含水量以种植10 a时最大,其中,种植10 a柠条的土壤含水量比种植5 a大14.66%,比种植15 a大28.56%;种植10 a的沙棘土壤含水量比种植5 a大22.26%,比种植15 a大14.20%。

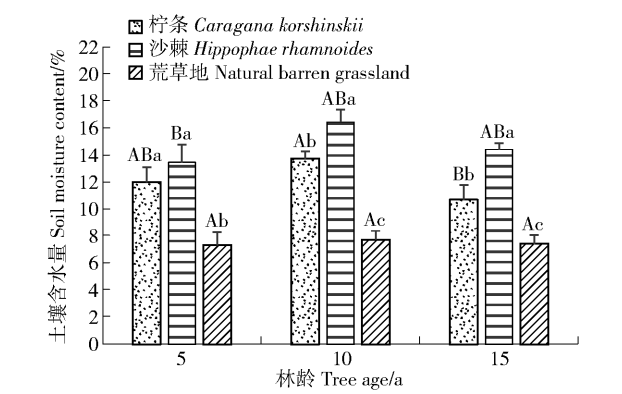


图3 不同年限不同林地覆被下土壤含水量变化  
Fig.3 Soil moisture changes in different years and different woodland covers

3.3 对土壤有机质的影响

图4是不同种植年限下不同林地的土壤有机质的变化情况。随着种植年限的增加,土壤有机质质量分数增加,其中,种植15 a的柠条土壤有机质质

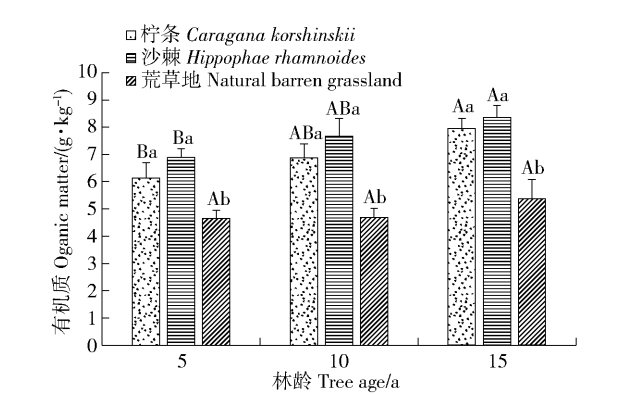


图4 不同年限不同林地覆被下土壤有机质质量分数变化  
Fig.4 Soil organic matter content changes in different years and different woodland covers

量分数比种植 10 a 大 15.67%,比种植 5 a 大 29.35%;种植 15 a 的沙棘土壤有机质质量分数比种植 10 a 大 8.77%,比种植 5 a 大 20.83%。荒草地在各生长年限内其土壤有机质质量分数差异性不显著( $P < 0.05$ )。不同林地覆被下土壤有机质质量分数大小表现为沙棘 > 柠条 > 荒草地,沙棘的多年平均土壤有机质质量分数比柠条大 9.48%,比荒草地大 55.64%;柠条的多年平均土壤有机质质量分数比荒草地大 42.17%。可见,风沙土整治区经林木覆被后,其土壤有机质质量分数明显大于天然荒草地的近 0.5 倍。

3.4 对土壤碳酸钙的影响

图 5 是不同种植年限下不同林地的土壤碳酸钙质量分数的变化情况。随着种植年限的增加,土壤碳酸钙质量分数降低,不同林地中以沙棘的质量分数最低,比柠条低 13.82%,比荒草地低 37.66%。种植 15 a 柠条的土壤碳酸钙质量分数比种植 10 a 低 10.28%,比种植 5 a 低 12.65%;种植 15 a 沙棘的土壤碳酸钙质量分数比种植 10 a 低 14.43%,比种植 5 a 低 10.08%。可见,在不同林地类别和不同林龄下,土壤碳酸钙的质量分数均达到显著性差异水平( $P < 0.05$ )。

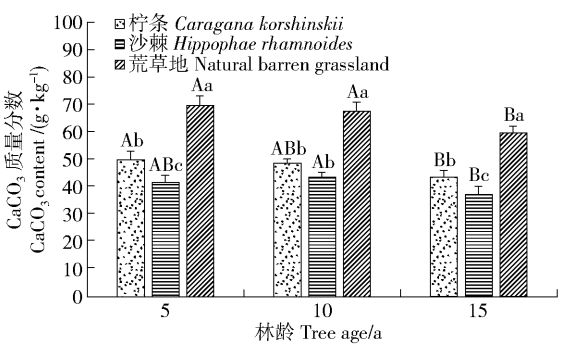


图 5 不同年限不同林地覆被下土壤碳酸钙质量分数变化  
Fig. 5 Soil calcium carbonate content changes in different years and different woodland covers

4 讨论

在陕北榆林孟家湾风沙土项目整治区,种植柠条和沙棘后,土壤特性得到明显改善。对各测定指标做相关性分析如表 1 所示,土壤密度与土壤含水量和土壤有机质间呈负相关,土壤碳酸钙与土壤含水量和土壤有机质间也呈负相关,且土壤碳酸钙和土壤有机质间的相关性较高( $P < 0.05$ )。说明在陕北风沙土整治区,种植沙棘和柠条后,随着土壤有机质质量分数的增加,土壤碳酸钙质量分数减少趋势明显,这是因为  $\text{CaCO}_3$  与

表 1 测定指标间相关关系

Tab. 1 Relationship among the measurement indicators

| 测定指标<br>Measurement indicator | 土壤密度<br>Bulk density | 含水量<br>Soil moisture | 有机质<br>Organic matter | 碳酸钙<br>Calcium carbonate |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| 土壤密度 Soil bulk density        | 1                    |                      |                       |                          |
| 土壤含水量 Soil moisture           | −0. 835 *            | 1                    |                       |                          |
| 有机质 Organic matter            | −0. 558              | 0. 821 *             | 1                     |                          |
| 碳酸钙 Calcium carbonate         | 0. 652               | −0. 857 *            | −0. 955 *             | 1                        |

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。Notes: \* indicates significant correlation at the 0.05 level (two-sided).

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 作为土壤胶结剂,影响土壤的紧实度,使土壤有机质质量分数明显减少<sup>[14]</sup>。同时,表 1 也说明土壤密度与土壤碳酸钙,土壤含水量与土壤有机质间均呈正相关。

植物根系的生长,通过团聚作用可降低土壤紧实度,从而增加土壤孔隙度<sup>[15]</sup>,所以在风沙土整治区科学种植覆被植物有利于土壤密度的降低,从而促进植物发育,根系生长和水土保持<sup>[16]</sup>。植被不只是土壤水分的消耗者,也是土壤水分的保护者<sup>[17-18]</sup>。从这个观点可知,柠条与沙棘的种植,对当地土壤水分的含蓄具有一定的积极作用。同时,本研究也明确指出随着林木种植年限的增加,土壤

含水量下降,土壤最大含水量出现在种植的第 10 年,而后随着林木继续生长,则加剧土壤的深层耗水<sup>[19]</sup>,使土壤深层含水量减少,这也将影响表层土壤含水量的降低,所以从水资源循环的角度上考虑,如何使风沙土整治区的林木可持续发展还有待进一步探索研究。天然荒草地的土壤有机质质量分数极低,当经过几期林木种植后,土壤有机质质量分数增加,这与梁月等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。不同林木下土壤碳酸钙质量分数随种植年限的增加而降低,这是因为风沙土区的环境处于干旱、半干旱的气候条件下,土壤形成的水分条件是季节性淋溶,随着时间的推移,矿物风化过程中释放的易溶性盐类大

部分被淋失,其中最活跃的元素钙在土体中发生淋溶,所以表层的土壤碳酸钙逐年减少<sup>[21]</sup>,其中沙棘较柠条减少的更加明显。对于土壤水分而言,不同时间、不同空间的含量不尽相同,所以在引导专项项目接下来的工作中,计划增大时空研究尺度,进一步揭示不同处理下土壤水分的时空异质性及运移规律。

5 结论

随着种植年限的增加,不同林地的土壤密度和土壤有机质质量分数增加,土壤含水量以整治后10 a 的最大,而土壤碳酸钙质量分数随整治年限的增加而降低。沙棘对比柠条,土壤密度小 3.10%,土壤碳酸钙质量分数小 13.82%,土壤含水量大 21.71%,土壤有机质质量分数 9.48%。所以,在陕北风沙土整治区种植沙棘后有助于改善风沙土的土壤结构性状。

6 参考文献

[1] 方晰,陈婵. 植被恢复对土壤 N、P 积累转化及其耦合关系影响的研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(2): 84.  
FANG Xi, CHEN Chan. Research progress on effects of vegetation restoration on soil N and P accumulation, transformation and their coupling [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(2): 84.

[2] LI X R, KONG D S, TAN H J, et al. Change in soil and vegetation following stabilization of dunes in the southeastern fringe of the Tengger Desert [J]. Plant and Soil, 2007, 300 (1/2): 221.

[3] 金争平. 砒砂岩区水土保持与农牧业发展研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 15.  
JIN Zhengping. Research on soil and water conservation and agriculture and animal husbandry development in feldspathic sandstone area [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2003: 15.

[4] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14.  
WANG Yuanchang, WU Yonghong, KOU Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 14.

[5] HAN Jichang, XIE Jianchang, ZHANG Yang. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy Land, Northwest China [J]. Chi-

nese Geographical Science, 2012, 22(5): 550.

[6] 张露, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 208.  
ZHANG Lu, HAN Jichang, LUO Lintao, et al. Water-holding characteristics of compounded soil with feldspathic sandstone and Aeolian sandy soil [J]. Journal of Northwest A&F University (National Science Edition), 2014, 42(2): 208.

[7] 刘举, 常庆瑞, 张俊华, 等. 黄土高原不同林地植被对土壤肥力的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(z1): 111.  
LIU Ju, CHANG Qingrui, ZHANG Junhua, et al. Effect of vegetation on soil fertility in different woodlands on Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University (National Science Edition), 2004, 32(z1): 111.

[8] 殷丽强, 梁月. 沙棘人工林对砒砂岩地区土壤物理性质变化的影响 [J]. 国际沙棘研究与开发, 2009, 4(5): 1.  
YIN Liqiang, LIANG Yue. Study on change of soil property of artificial seabuckthorn plantation in arsenic sandstone [J]. Journal of International Seabuckthorn Research and Development, 2009, 4(5): 1.

[9] 杨方社, 李怀恩, 曹明明, 等. 小型人工沙棘林对砒砂岩沟道土壤有机质与水分的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 110.  
YANG Fangshe, LI Huaian, CAO Mingming, et al. Effects of small-scale artificial seabuckthorn forest on soil organic matter and moisture in the soft rock region gully [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(9): 110.

[10] 韩丽文, 李祝贺, 单学平, 等. 土地沙化与防沙治沙措施研究 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 210.  
HAN Liwen, LI Zhuhe, SHAN Xueping, et al. Research on strategy for land desertification control [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 210.

[11] 孙丽敏, 侯旭光. 干旱、半干旱地区植被治沙造林技术措施 [J]. 防护林科技, 2005, 5(4): 90.  
SUN Limin, HOU Xuguang. Technical measures for vegetation control and afforestation in arid and semi-arid areas [J]. Protection Forest Science and Technology, 2005, 5(4): 90.

[12] 姚俊娜, 秦奋. 基于 GIS 和 RS 的砒砂岩区生态环境质量综合评价 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 193.  
YAO Junna, QIN Fen. Comprehensive assessment on eco-environmental quality of the area of sandston based on RS and GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21 (6): 193.

[13] 卢立娜, 赵雨兴, 胡莉芳, 等. 沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响 [J]. 中国沙漠, 2015, 35 (5): 1171.

LU Lina, ZHAO Yuxing, HU Lifang, et al. Effects of *Hippophae rhamnoides* plantation on soil bulk density, porosity and moisture capacity in the arsenic sandstone area of Inner Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35 (5): 1171.

[14] 陈宇轩, 丁国栋, 高广磊, 等. 呼伦贝尔沙地风沙土有机质和碳酸钙含量特征 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17 (4): 104.

CHEN Yuxuan, DING Guodong, GAO Guanglei, et al. Content characteristics of organic matter and calcium carbonate of Aeolian soils in Hulun Buir Sandy land [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17 (4): 104.

[15] 魏彬萌, 李忠徽, 王益权. 渭北果园土壤紧实化改良效果初探 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (5): 166.

WEI Bimeng, LI Zhonghui, WANG Yiquan. Preliminary study on improvement of soil compaction in Weibei apple orchard [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37 (5): 166.

[16] HUANG Yuhan, CAO Yingui, PIETRZYKOWSKI M, et al. Spatial distribution characteristics of reconstructed soil bulk density of opencast coal-mine in the loess area of China [J]. Catena, 2021, 199:105116.

[17] ORLOWSKI N, KRAFT P, BREUER L. Exploring water cycle dynamics through sampling multitude stablewater isotope pools in a small developed landscape of Germany [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2015, 12(2): 1809

[18] ZHANG Baoqing, HE Chansheng, BURNHAM M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 539: 436.

[19] 张文飞, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 140.

ZHANG Wenfei, WANG Xing, WANG Youke, et al. Growth and water consumption of jujube with water-saving pruning in deep dried soil of loess hilly area [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 140.

[20] 梁月, 殷丽强. 砒砂岩区沙棘人工林对土壤化学性质的影响分析 [J]. 国际沙棘研究与开发, 2014, 12(2): 15.

LIANG Yue, YIN Liqiang. Impact analysis of artificial seabuckthorn plantation on soil chemical property in arsenic sandstone area [J]. Journal of International Seabuckthorn Research and Development, 2014, 12(2): 15.

[21] 宋佃星, 马莉. 黄土高原碳酸钙含量变化特征及气候表征研究:以西安和宝鸡为例 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 918.

SONG Tianxing, MA Li. The variety characteristic of calcium carbonate content and represented climate of the Loess Plateau [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 46(6): 918.