

毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征

姜丽娜¹, 马洁¹, 刘建康², 王少杰¹, 赵健宇¹, 白建华¹

(1. 中国林业科学研究院 生态保护与修复研究所, 北京 100091;

2. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 探讨不同植被恢复措施下土壤理化性质的空间分布特征, 为半干旱沙区植被恢复提供理论依据。[方法] 以毛乌素沙地西南边缘3种典型植被恢复模式(封育草地、飞播林地和人工柠条林地)为研究对象, 以退化草地为对照, 通过采集0—40 cm范围内3个土层的土壤, 研究了其土壤理化指标和土壤综合肥力。[结果] ①在不同措施下土壤表层(0—10 cm)含水量显著增加, 而在深层(10—40 cm)土壤则显著降低; 与之相反的是土壤表层容重显著降低, 而在深层土壤差异不显著, 呈现弱变异; 植被恢复显著降低了上层(0—20 cm)土壤pH值, 而对20—40 cm土层差异不显著; 此外, 同一植被类型下随着土层加深土壤含水量(SWC)、容重(BD)、pH值均逐渐增加。②不同措施下土壤有机质(SOM)、全氮(TN)含量显著增加, 封育样地SOM最高, 飞播样地土壤TN最高, 而速效磷(AP)含量显著降低, 土壤全磷(TP)、SOM、TN等养分含量具有表聚性, 土壤AP和速效氮(AN)含量在不同植被恢复、不同土层之间存在差异性。③土壤综合肥力指数呈现为: 飞播样地(0.794) > 封育样地(0.662) > 对照样地(0.637) > 柠条林地(0.603), 即土壤质量在飞播样地最高, 而在柠条林地最低。[结论] 3种植被恢复模式均对土壤各理化指标有显著影响, 不同植被恢复措施导致土壤各指标在垂直剖面上发生不同程度的变异, 毛乌素沙地适宜进行飞播造林, 而不宜大面积种植人工柠条林。

关键词: 植被恢复措施; 土壤理化性质; 毛乌素沙地; 土壤综合肥力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0001-07

中图分类号: S728.4

文献参数: 姜丽娜, 马洁, 刘建康, 等. 毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 1-7. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221012.004; Jiang Lina, Ma Jie, Liu Jiankang, et al. Spatial distribution of soil physicochemical properties under different vegetation restoration measures in Mu Us sand land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 1-7.

Spatial Distribution of Soil Physicochemical Properties Under Different Vegetation Restoration Measures in Mu Us Sand Land

Jiang Lina¹, Ma Jie¹, Liu Jiankang², Wang Shaojie¹, Zhao Jianyu¹, Bai Jianhua¹

(1. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of

Forestry, Beijing 100091, China; 2. Breeding Base for State Key Lab. of Land Degradation and

Ecological Restoration in Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution characteristics of physicochemical properties under different vegetation restoration measures were analyzed in order to provide a theoretical basis for vegetation restoration in semi-arid sandy areas. [Methods] Three typical restoration models [enclosed grassland (EG), aerial seeded woodland (AS), and artificial *Caragana korshinskii* woodland (AK)] were compared against a degraded grassland (CG) used as control in the Southwest Mu Us sand land. Soil physicochemical indexes and a comprehensive soil fertility index in the 0—40 cm soil layer were analyzed. [Results] ① Soil water

收稿日期: 2021-12-08

修回日期: 2022-03-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“土壤斑块异质性下荒漠草原植被空间格局及其形成机制”(32001117); 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所结余经费专项资金(XJS202002)

第一作者: 姜丽娜(1983—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 博士, 高级工程师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: jianglina@caf.ac.cn.

通讯作者: 白建华(1966—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨人, 硕士, 高级工程师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: baijianhua@caf.ac.cn.

content (SWC) in the 0—10 cm layer significantly increased under the three different vegetation restoration measures, but decreased significantly in the 10—40 cm layer. In contrast, soil bulk density (BD) in the 0—10 cm layer decreased significantly, but there was no significant difference in 10—40 cm layer, which showed weak variation. Vegetation restoration significantly reduced soil pH value in the 0—20 cm layer, but showed no significant difference in the 20—40 cm layer. In addition, SWC, BD, and pH value increased as soil depth increased under the same vegetation restoration measure. ② Soil organic matter (SOM) and total nitrogen (TN) increased significantly, while available phosphorus (AP) decreased significantly under different vegetation restoration measures. SOM was highest in EG, but TN was highest in AS. Total phosphorus (TP), SOM, and TN exhibited surface aggregation in the soil. AP and available nitrogen (AN) were different for different restoration measures and soil layers. ③ The soil comprehensive fertility index followed the order of AS (0.794) > EG (0.662) > CG (0.637) > AK (0.603), indicating that soil quality was highest in AS, but lowest in AK. [Conclusion] Various vegetation restoration measures had significant effects on soil physiochemical properties, and resulted in different variations in soil indexes in the vertical soil profile. Aerial seeding is suitable for afforestation, while large area artificial *Caragana korshinskii* woodland is not suitable for the Mu Us sand land.

Keywords: vegetation restoration measures; soil physical and chemical properties; Mu Us sand land; comprehensive soil fertility

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,处于农、牧、草交错地带,属于典型的生态脆弱区,其特殊的地理气候条件导致环境容量小,对人类活动极为敏感,极易发生土地退化、沙化等问题。土地沙漠化是一种由土壤质地破坏和养分流失引起的土壤粗化、肥力下降现象^[1-2],植被作为生态系统的主体初级生产者,人工植被建设对沙漠化恢复与控制具有重要作用^[3]。经过“三北”防护林体系建设,退耕还林,退牧还草,京津风沙源综合治理等一系列生态工程的建设,毛乌素地区土地退化得到不同程度的恢复,土地沙漠化现象得到有效抑制,生态环境得到显著改善。

土壤与植物之间存在反馈机制,在脆弱生态系统退化与恢复过程中土壤与植物群落之间相互影响、相互制约^[4-5]。土壤作为植被赖以生存和发展的基础,可为植被生长提供必要的营养基础与环境条件^[6],土壤性状通过影响植物生长发育过程,造成植被群落种组成、结构功能等的变化,进而改变群落生产力^[7]。同时植被可通过影响凋落物归还量、组成及分解,造成土壤碳、氮、磷等元素的富集和再分配,影响土壤养分循环、积累与转化过程,引起土壤理化性质的变化^[5,8]。沙区在进行人工植被恢复后可显著改善土壤性状,进而逆转土地沙漠化趋势^[9]。因此,研究植被恢复对土壤理化性质的影响过程对退化土地生态恢复与重建具有重要意义。

土壤理化性质作为衡量土壤肥力和质量的重要指标,是表征生态系统恢复效果重要标志。然而,植被恢复的措施多种多样,不同的植被恢复措施可能引

起土壤性状的差异变化^[5,10]。国内外对于毛乌素沙地植被恢复对土壤性状的影响进行了大量的研究^[11-12]。王丽梅等^[13]从土壤固碳角度提出,乔木为毛乌素沙地的最佳植被恢复类型。陈闻等^[8]从土壤养分的角度研究了6种典型固沙植被的差异性影响,指出种植花棒林对土壤肥力改善状况最好。而何群等^[14]从土壤肥力恢复的角度研究了不同植被类型的影响,并指出灌木与灌草结合的恢复模式较单一草本模式更有利于提高土壤修复效果。然而,此类研究多针对短期恢复效果或不同植被恢复类型,而对不同恢复措施下土壤性状和土壤肥力的综合影响研究较少。因此,本研究以毛乌素沙地西南边缘已进行17 a 植被恢复的封育草地、飞播林地、人工柠条林地等3种植被恢复措施为研究对象,通过构建土壤养分指数对比评价不同恢复措施对土壤肥力改良的综合影响,以为沙区退化土地植被恢复与重建提供理论依据。

1 研究区概况

本研究在宁夏回族自治区盐池县(106°30′—107°41′E, 37°04′—38°10′N)境内开展,研究区位于毛乌素沙地西南缘,地势南高北低,海拔平均在1 295~1 951 m 南部为黄土丘陵区、北部为鄂尔多斯缓坡丘。本文研究区位于温带大陆性季风气候区,多年平均气温为8.1℃,高于10℃积温为2 945℃;日照充足,年均日照时数约为2 876.2 h,年均无霜期为165 d;气候干燥,常年干旱少雨,多年平均降水量为285.5 mm,受季风影响降水分布极为不均匀,80%以上发生在6—9月,多年平均蒸发量多达2 024 mm;

多年平均风速为 2.8 m/s,受西北强风影响,春季易发生沙尘暴。研究区土壤类型为风沙土,质地松散,养分贫瘠,土壤矿质部分由细砂颗粒组成,黏、粉粒含量相对低。植物主要以旱生和中旱生草本植物为主,植物区系属于欧亚草原区亚洲中部亚区,植被主要以油蒿 (*Artemisia ordosica*)、沙柳 (*Salix psammophila*)、扬柴 (*Hedysarum mongolicum*)、柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*)、中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 等灌木、半灌木植物为主。

2 研究方法

2.1 样地布设与采样

在研究区内选择 2002 年进行植被恢复的封育草地(EG)、飞播林地(AS)、人工柠条林地(AK)为研究样地,以附近的退化草地(CG)为对照。各个恢复样地外围均设置围栏以杜绝牲畜干扰,飞播造林地飞播物种为花棒、扬柴,而对照样地无任何保护措施,仍受当地传统畜牧业的影响。在每个样地随机建立 5 个地形、地势基本一致的样方,用以进行土壤剖面采样。于 2019 年 8 月中下旬在 3 个样方内利用 S 形取样法采集 5 个土壤样品,采集土样前先去土壤表面腐殖层,然后用直径 7 cm 的土钻在 0—40 cm 范围内收集土壤剖面样品,分 3 层取样(0—10, 10—20, 20—40 cm),取两次。其中一个土壤样品用铝盒封装,带回实验室用以测定土壤容重和土壤含水量;另一个样品在将同样地、同土层土壤充分混合后,过筛以去除植物根、石子、枯枝落叶等,带回实验室自然风干,用以测定土壤养分元素含量和 pH 值等指标。

2.2 室内样品分析

土壤含水量采用烘干称重法进行测定(105 °C, 24 h);土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加加热法;全氮使用凯氏定氮法;速效氮采用碱解扩散法;全磷采用硫酸—高氯酸消煮法;速效磷采用浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵—火焰光度计法;土壤 pH 值采用 pH 测量仪测定;土壤容重用环刀法测定。

2.3 数据处理分析

本文采用土壤肥力质量指数法进行土壤肥力评价,它主要是将评价结果转化为 0.1~1.0 之间的数值,直观评价结果,数值越接近 1.0 表示土壤肥力越高。本文用权重加权求和模型 FQI 计算土壤综合肥力,其计算公式如下:

$$FQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_i \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 个因子的权重; F_i 为第 i 个因子的隶属度; n 为参评因指标数量。

用 Excel 2019 进行数据的整理与基本特征分析,用 SPSS 20.0(IBM, Amund, NY, USA) 软件进行方差分析和主成分分析(PCA),采用单因素方差分析(One-way ANOVA, Duncan 法)检验不同土层及不同植被恢复模式对土壤各理化性质的影响,用主成分分析法分析不同植被恢复模式对土壤综合肥力的影响,用 Origin2018 进行图形绘制。

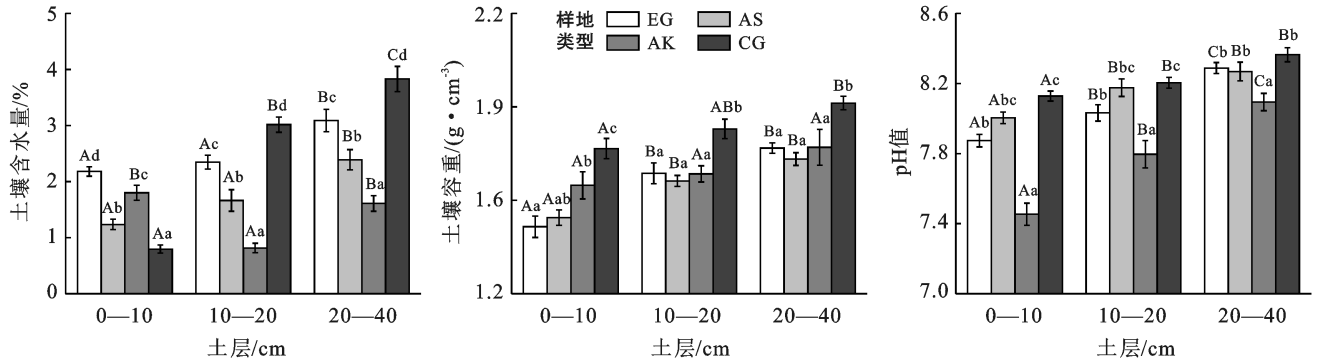
3 结果与分析

3.1 不同恢复模式下物理性质变化

从图 1 可知,不同恢复措施之间土壤含水量和土壤容重差异显著($p < 0.05$),即不同恢复措施对两者有显著影响。0—10 cm 土层土壤含水量表现为:对照退化草地(0.80%) < 飞播草地(1.24%) < 柠条林地(1.80%) < 封育草地(2.18%),各样地之间差异显著($p < 0.05$),说明植被恢复可显著增加土壤表层含水量;在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层各样地土壤含水量均表现为:柠条林地 < 飞播草地 < 封育草地 < 对照退化草地,且各个样地之间差异显著($p < 0.05$),说明植被恢复显著降低 10—40 cm 土壤含水量;对不同恢复措施下土壤含水量随土层加深的变化特征分析后发现,除柠条林地外,其余 3 个样地土壤含水量均随土层加深逐渐增加,而柠条林地在 10—20 cm 土层最低,表现为:10—20 cm 土层 < 0—10 cm 土层 < 20—40 cm 土层。0—10 cm 土层 4 个样地土壤容重之间差异显著($p < 0.05$),土壤容重大小表现为:封育草地(1.52 g/cm³) < 飞播草地(1.54 g/cm³) < 柠条林地(1.65 g/cm³) < 对照退化草地(1.74 g/cm³),而在 10—20 cm 土层和 20—40 cm 土层各恢复样地土壤容重之间差异不显著($p > 0.05$),且显著小于对照样地($p < 0.05$);对不同恢复措施下土壤容重随土层加深的变化特征分析后发现,4 个样地土壤容重均随着土层增加逐渐增加。对不同恢复措施下土壤 pH 值随土层深度增加的变化特征分析后发现,随着土层增加土壤 pH 值逐渐增加;同一土层中 pH 值最小值均在柠条林地,最大值均在对照样地,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 pH 值大小表现为:柠条林地 < 封育草地 < 飞播草地 < 对照退化草地,且不同样地之间差异显著,说明植被恢复可显著降低上层土壤 pH 值($p < 0.05$)。

3.2 不同恢复模式下土壤养分特征变化

分析不同恢复模式下土壤养分性质发现(图 2),不同植被恢复措施对土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷等养分指标有显著影响($p < 0.05$),随着土层深度增加各土壤养分性质变化显著。



注:①不同小写字母表示同一土层下不同恢复措施之间显著性差异($p < 0.05$),不同大写字母表示同一恢复措施下不同土层之间差异显著性($p < 0.05$);②EG为封育样地,AS为飞播样地,AK为柠条林地,CG为对照样地。下同。

图 1 毛乌素沙地不同恢复模式下土壤容重、土壤含水量和 pH 值变化

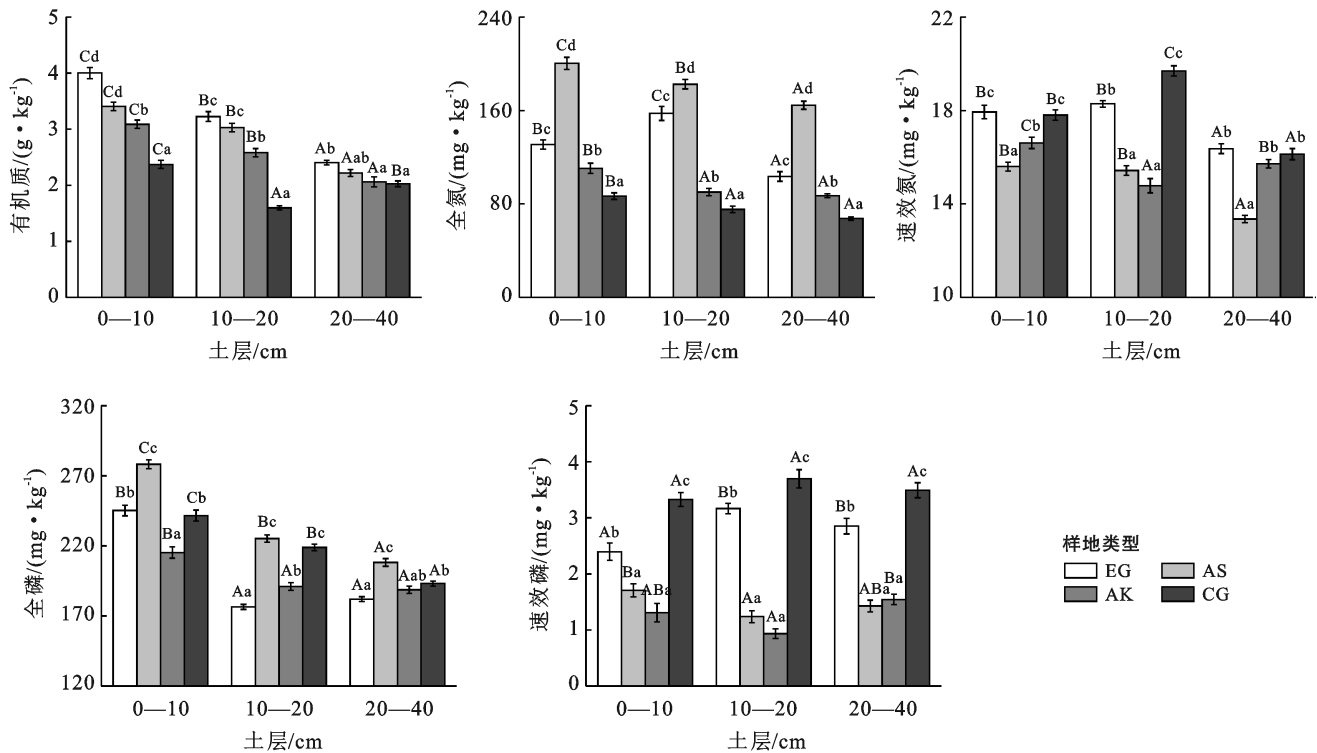


图 2 毛乌素沙地不同恢复模式下土壤养分元素变化

由图 2 可知,各个样地土壤有机质水平处于较低水平,在 2~4 g/kg 之间,除在自由放牧样地外,其余样地均表现为随土层加深土壤有机质含量逐渐增加,且在 0—10 cm 土层土壤有机质显著高于其余土层 ($p < 0.05$);在同一土层不同植被恢复模式下土壤有机质含量总体表现为:封育样地>飞播样地>柠条林地>对照样地,0—10 cm 土层不同植被模式之间差异显著 ($p < 0.05$)。除在封育样地外,其余各样地土壤全氮均随土壤加深逐渐降低;在同一土层中土壤全氮含量表现为:飞播样地>封育样地>柠条林地>对照样地,且各样地之间差异显著,说明植被恢复对土壤氮素含量有显著影响 ($p < 0.05$)。土壤速效氮在封

育样地和对照样地内随土层加深先增加后降低,在飞播样地则逐渐降低,在柠条林地表现出先减小再增加的趋势。土层速效氮含量在 0—10 cm 和 20—40 cm 土层均表现为:封育样地>对照样地>柠条林地>飞播样地,而在 10—20 cm 土层表现为:对照样地>封育样地>飞播样地>柠条林地。分析土壤磷素含量发现,该地区土壤磷含量相对较低,全磷含量在 170~280 mg/kg 之间,而速效磷含量在 0.9~3.7 mg/kg 之间。土壤全磷在封育样地表随着土层加深表现出先减小后增加的趋势,在其余样地均表现为逐渐降低;在同一土层中各样地之间差异显著,均在飞播样地含量最高,在 10—20 cm 和 20—40 cm 两层表现

为:飞播样地>对照样地>封育样地>柠条林地。土壤速效磷在封育样地和对照样地均表现出随土层加深先增加后减小的趋势,而在飞播样地和柠条林地趋势正好相反;同一土层内各恢复样地显著小于对照样地,说明植被恢复可降低土壤速效磷含量($p<0.05$),在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中各样地表现趋势为:对照样地>封育样地>飞播样地>柠条林地,而在 20—40 cm 土层表现趋势为:对照样地>飞播样地>封育样地>柠条林地。

3.3 土壤肥力综合评价

通过对不同样地土壤 8 个指标进行主成分分析,得出各主成分特征值、方差贡献率、累计贡献率、公因子方差和载荷矩阵(表 1),通过计算得出不同土壤因子的指标权重,利用权重加权求和法,计算得出不同样地土壤综合肥力(表 2)。如表 1 所示,特征值大于 1 的主成分有 3 个,分别为 3.268, 1.712 和 1.144,其对应的主成分贡献率分别为 40.855%, 21.405% 和 14.298%,累计贡献率为 76.558%,说明前 3 个主成分可反映不同样地土壤综合肥力水平。利用公因子方差求得各个指标的权重系数,表现为:速效磷>含水量>pH 值>速效氮>有机质>全氮>容重>全磷。不同样地土壤综合得分表现为:飞播样地(0.794)>封育样地(0.662)>对照样地(0.637)>柠条林地(0.603),即土壤综合肥力在飞播样地最高,而在柠条林地最低。

表 1 毛乌素沙地土壤肥力综合评价指标

土壤指标	主成分特征向量			公因子方差	权重
	PC ₁	PC ₂	PC ₃		
容重	0.718	-0.450	-0.114	0.732	0.060
含水量	0.667	0.181	0.346	0.597	0.186
pH 值	0.570	-0.058	0.732	0.865	0.178
有机质	-0.779	0.301	0.034	0.698	0.100
全氮	-0.719	-0.040	0.595	0.874	0.073
速效氮	0.266	0.884	-0.249	0.915	0.141
全磷	-0.602	0.385	0.208	0.554	0.037
速效磷	0.651	0.672	0.123	0.891	0.224
特征值	3.268	1.712	1.144		
方差贡献率	40.855	21.405	14.298		
累计方差贡献率	40.855	62.261	76.558		

表 2 毛乌素沙地不同植被措施影响下土壤肥力综合得分及排名

样地	综合得分	排序
封育样地	0.662	2
飞播样地	0.794	1
柠条林地	0.603	4
对照样地	0.637	3

4 讨论与结论

4.1 讨论

土壤水分是土壤和植被间互动的重要环节。土壤水分受到土壤表面植被类型、土壤性状、土地利用性质、地形等多方面影响^[15-17]。特别是在降水稀少的干旱、半干旱地区,水是制约植被生存生长的主要限制因子^[18]。不同植被恢复措施对水分和土壤发育等方面产生差异化影响,在本研究中多年植被恢复样地土壤表层含水量显著增加,而深层含水量显著降低。从植物耗水角度,对照样地植物以浅根性的一年生草本植物为主,灌木、半灌木等深根性植物相对较少,水分利用来源主要来自降雨补充的浅层或表层土壤水分,而对深层土壤水分利用较少,导致其表层土壤水分含量较低;而在植被恢复样地,耗水较大的深根性灌木、多年生草本植物发育较好,对深层土壤耗水相对较高^[19],因此,深层土壤含水量相对较低。从水分入渗角度,植被恢复后因长期缺乏人类活动土壤结皮发育较好,且在降水时易形成径流,减少了降水的入渗^[20-21];而对照样地受放牧影响表层土壤结皮发育不良,加之植被盖度较低,降水在地表很难形成径流,利于降水入渗^[22],使得深层水分含量相对较高。

土壤容重是土壤的基本性状。土壤容重受成土母质、生物扰动及气候等因素综合影响,是表征土壤肥力的主要因子之一^[23]。在本研究中,不同植被恢复模式均显著降低了各土层土壤容重,这与关其格等^[24]和陈闻等^[8]的研究结论类似。主要是由于退化草地因受牲畜践踏及采食,使得土壤容重相对较高,而植被恢复样地土壤根系发育较好,有效减小了土壤板结现象,导致土壤容重降低^[25]。在实施不同的植被恢复后,土壤容重随土层深度变化发生不同程度的变化。主要是因为不同植被的根系分布存在差异^[26],封育样地多以浅根性一年生或多年生草本植物为主,而在柠条林地和飞播样地分别以扬柴、花棒和柠条锦鸡儿等根系发达的植物为主,随着大量枯枝落叶、死根等凋落物的逐渐分解以及腐殖质在土壤中的逐步累积,使得土壤疏松多孔,土壤容重相对较低^[8,17]。

土壤养分是植被生长的基础,可反映植物生长的营养环境优劣。在本研究中,不同植被恢复措施均对各土壤养分指标产生显著影响,其中土壤有机质、全氮含量显著增加,而速效磷显著降低,土壤全磷、有机质、全氮具有“表聚性”,土壤速效磷和速效氮含量在不同植被恢复、不同土层之间存在差异性,这与前人的研究结果类似^[8,27-28]。在植被恢复过程中随着地上植物繁殖生长,削弱了风力对表层土壤的侵蚀,加大

了对空气中细小尘埃的拦截,使得表层土壤中营养物质增加^[29-30]。此外,植被恢复后随着植物的繁殖生长将固定了大量营养物质,并以凋落物、菌根、死根等形式进入土壤,随着这些物质逐步分解,加速了生物化学物质转化,增加了对土壤养分元素的输入^[31];同时破坏了土壤结构,形成了疏松多孔的土壤环境,增加了土壤中氧气含量浓度,增强了土壤中微生物活性,可进一步加速枯落物分解速率^[32]。以上综合因素导致植被恢复后土壤发育速度加快,提高了各层土壤中有机质及全氮含量。正因为根系、落叶等枯落物对不同土层养分元素输入的不同,以及土壤向下的淋溶过程,导致了有机质、全氮、全磷等营养物质在垂直空间上分布的变异^[25]。同时,植被恢复后随着枯落物分解量的积累,产生的有机酸进一步中和了土壤内碱性物质,使得土壤 pH 值有所降低^[33]。pH 值可显著影响土壤养分含量,较低的土壤 pH 值可有效降低土壤磷元素的有效性,导致土壤速效磷含量降低。土壤 pH 值的降低加速了土壤凋落物的分解,促使植被大量生长,直接吸收了土壤速效氮,因此在植被恢复样地土壤速效氮含量相对较低。

由于土壤肥力水平形成机制复杂,不同学者对土壤肥力的评价方法各不相同^[10,34]。其中土壤肥力指数法是一种定量评价土壤肥力的研究方法,可有效反映土壤质量的变异信息。植被恢复后随着土壤结构、质地变化及各种营养物质的积累,土壤综合肥力发生了变化^[35]。由于不同植被恢复措施下群落物种组成存在差异,使得其防风阻沙效益及拦截枯落物量有所不同,对土壤理化性质产生不同的影响^[31],导致土壤肥力质量存在差异。在本研究中,通过选取土壤含水量、容重、pH 值、有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷等 8 个指标作为评价土壤肥力质量的土壤因子。结果表明,经过 17 a 的植被恢复后,飞播造林地土壤综合肥力指标最好,柠条林地土壤综合肥力指标最低,甚至低于对照退化草地。这说明从维持土壤肥力的角度飞播造林种植花棒、杨柴是毛乌素沙地相对较好的恢复措施,而大面积种植柠条林并不适用于毛乌素沙地退化土地恢复。

4.2 结论

本研究对毛乌素沙地 3 种不同植被恢复模式(封育、飞播及人工柠条林建设)土壤理化性质及综合肥力进行了评价,得出以下结论。土壤各理化指标在不同样地、不同土层之间差异显著;不同植被恢复模式下土壤养分呈现较为明显的垂直分布特点,特别是土壤化学指标,具有表聚性特征;不同植被恢复模式对土壤肥力的作用效果不同,表现为:飞播(0.794) > 封

育(0.662) > 对照(0.637) > 柠条林地(0.603)。综上所述,从土壤性状恢复的角度出发,飞播造林是毛乌素沙地较为适宜的植被恢复措施,而大面积人工种植柠条林不利于该区域退化土地生态恢复。

[参 考 文 献]

- [1] 唐庄生,安慧,邓蕾,等.荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化[J].生态学报,2016,36(4):991-1000.
- [2] 赵哈林,李玉强,周瑞莲.沙漠化对科尔沁沙质草地生态系统碳氮储量的影响[J].应用生态学报,2007,18(11):2412-2417.
- [3] Su Yongzhong, Zhao Wenzhi, Su Peixi, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: A case study in Hexi Corridor, Northwest China [J]. Ecological Engineering, 2007,29(2):117-124.
- [4] Tao Ye, Zhang Yuanming. Plant traits with different dimensions of shrubs represent different spatial patterns and plant-to-plant interactions in a temperate desert [J]. EXCLI Journal, 2013,12:658-669.
- [5] 袁媛,张鹤,武抒华,等.植被恢复对毛乌素沙地土壤 pH 和养分含量的影响[J].土壤通报,2021,52(1):148-156.
- [6] Wu Gaolin, Liu Zhenheng, Zhang Lei, et al. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of Western China [J]. Plant and Soil, 2010,332(S1/2):331-337.
- [7] 胡婵娟,刘国华,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面尺度上不同植被格局下植物群落和土壤性质研究[J].干旱区地理,2012,35(5):787-794.
- [8] 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.
- [9] 常学礼,蔡明玉,张继平,等.科尔沁沙地典型地区人工造林对沙漠化过程的影响[J].中国漠,2009,29(4):611-616.
- [10] 林帅,闫伟,贾学文,等.毛乌素沙地不同林型下土壤肥力综合评价[J].北方园艺,2019(15):91-98.
- [11] 卞莹莹,张志敏,付镇,等.荒漠草原区不同植被恢复模式土壤微生物菌落分布特征及其与土壤理化性质的相关性[J].草地学报,2021,29(4):655-663.
- [12] Yang Zhaoping, Baoyin T, Li F Y. Long-term effects of restoration measures on soil C and C: Nutrient ratios in a semiarid steppe [J]. Ecological Engineering, 2020, 153:105913.
- [13] 王丽梅,张谦,白利华,等.毛乌素沙地 3 种人工植被类型对土壤颗粒组成和固碳的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):88-94.
- [14] 何群,席欢,万婷.不同植被恢复模式对红原沙化草地土壤理化性质的影响[J].四川环境,2017,36(1):35-40.
- [15] Zhou Ji, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Temporal sta-

- bility of surface soil moisture of different vegetation types in the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2015, 128:1-15.
- [16] Cantón Y, Solé-Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285(1/2/3/4):199-214.
- [17] 陈闻.毛乌素沙地不同人工植被措施对土壤性质的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [18] Liu Xinping, He Yuhui, Zhang Tonghui, et al. The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12):8699-8708.
- [19] Oba G, Vetaas O R, Stenseth N C. Relationships between biomass and plant species richness in arid-zone grazing lands [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(4):836-845.
- [20] 张克斌,卢晓杰,李瑞.北方农牧交错带沙地生物结皮研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):147-151.
- [21] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):177-182.
- [22] 赵景波,马延东,罗小庆,等.巴丹吉林沙漠沙山表层径流的发现及其指示意义[J].中国科学(地球科学),2017,47(4):461-472.
- [23] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- [24] 关其格,浩必斯嘎拉图,杨越,等.毛乌素沙地南缘人工恢复植被对沙地土壤理化性质的影响[J].安徽农业科学,2013,41(34):13217-13220.
- [25] 李永宁,王忠禹,王兵,等.黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J].水土保持学报,2019,33(6):176-181.
- [26] 王彦武,廖超英,徐恒.毛乌素沙地固沙林土壤物理性状研究[J].西北林学院学报,2008,23(3):36-39.
- [27] 张立欣,段玉玺,王伟峰,等.毛乌素沙地不同植被类型的土壤颗粒分形与土壤碳氮变化特征[J].东北林业大学学报,2016,44(8):55-60.
- [28] 张瑞,张景波,曹良图,干旱区土地利用和土壤改良及植被恢复方式对沙地养分的恢复效应[J].水土保持研究,2010,17(4):153-157.
- [29] Zhou Zhiyu, Li Fengrui, Chen Shanke, et al. Dynamics of vegetation and soil carbon and nitrogen accumulation over 26 years under controlled grazing in a desert shrubland [J]. *Plant and Soil*, 2011, 341(1/2):257-268.
- [30] Shumway S W. Facilitative effects of a sand dune shrub on species growing beneath the shrub canopy [J]. *Oecologia*, 2000, 124(1):138-148.
- [31] Prietzel J, Bachmann S. Changes in soil organic C and N stocks after forest transformation from Norway spruce and Scots pine into Douglas fir, Douglas fir/spruce, or European beech stands at different sites in Southern Germany [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 269:134-148.
- [32] Shi Xiaoming, Li Xiao gang, Li Chun tao, et al. Grazing exclusion decreases soil organic C storage at an alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57:183-187.
- [33] 刘佳楠,常海涛,赵娟,等.宁夏荒漠草原柠条锦鸡儿枯落物分解特征及其影响因素[J].生态学报,2019,39(11):4039-4048.
- [34] 黄海娟.桉树人工林土壤肥力质量指标的筛选与评价[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2021.
- [35] 李清雪,贾志清.高寒沙地不同植被恢复类型土壤肥力质量差异及评价[J].土壤通报,2015,46(5):1145-1154.