DOI:10. 16853/j. cnki. 1009-3575. 2026. 05. 003

科尔沁沙地南缘退化杨树人工林改造对土壤理化性质影响研究

赵梦迪[1],赵鹏武[1,2,*],刘晓彬[2],曹立春[2],岳永杰[1,*]
(1. 内蒙古农业大学林学院,呼和浩特 010019;2. 内蒙古赛罕乌拉森林生态系统国家定位观测研究站,赤峰 025150)

摘要:为了解退化林改造对土壤理化性质的影响,以科尔沁沙地南缘敖汉旗退化杨树人工林为研究对象,设置樟子松和山桃林(PE)、云杉和家榆林(PU)、樟子松和杨树林(PP)3种混交改造模式及未改造模式(CK)4个处理为研究样地,分析和探讨科尔沁沙地退化杨树人工林改造对土壤理化性质的影响。研究表明:PE和PU改造模式相对PP模式对土壤理化性质有显著影响(P<0. 05)。在不同土层深度,PE和PU组土壤容重显著低于CK组(P<0. 05),而PE和PU组土壤孔隙度和土壤含水率均显著高于CK组(P<0. 05)。3种混交改造模式随着土层深度增加,土壤氮含量下降趋势趋于平缓。不同土层深度PP组碱解氮含量显著高于CK组(P<0. 05);PE和PU组全碳含量高于CK组且PE组土壤全碳含量在40~60 cm最大;4个处理对土壤pH值和有效磷含量无显著影响(P>0. 05)。随土层深度增加,4个处理土壤有机质含量均呈现下降趋势;除土层0~10 cm各组土壤有机质含量无显著差异(P>0. 05),其他土层PE、PU和PP组土壤有机质含量均高于CK组。研究结果对森林生态系统土壤管理和退化植被恢复具有重要意义。

关键词:科尔沁沙地;人工林;退化;改造;土壤理化性质
中图分类号:S714. 2 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-3575(2026)05-0017-09

Analysis of Physical and Chemical Properties of the Soil in the Artificial Forest on the Southern Edge of Horqin Sandy Land

ZHAO Mengdi[1], ZHAO Pengwu[1,2,*], LIU Xiaobin[2], CAO Lichun[2], YUE Yongjie[1,*]
(1. *College of Forestry*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010019, *China*;
2. *National Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Saihanwula*, *Inner Mongolia*, *Chifeng* 025150, *China*)

Abstract: To understand the impact of degraded forest transformation on soil physical and chemical properties, a study was conducted on degraded poplar plantations at the southern edge of the Horqin Sandy Land in Aohan Banner. Four experimental treatments were set up, i. e., three mixed-planting transformation models (PE: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Prunus persica*, PU: *Picea asperata* and *Caragana microphylla*, and PP: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Populus*), and a control (CK) without transformation. The study investigated and analyzed the effects of the transformation of degraded poplar plantations in the Horqin Sandy Land on soil physical and chemical properties. The results showed that the PE and PU transformation models had a significant impact on soil physical and chemical properties compared to the PP model (P<0. 05). At different soil depths, the soil bulk density of the PE and PU groups was significantly lower than that of the CK group (P<0. 05), while the soil porosity and soil moisture content of the PE and PU groups were significantly higher than those of the CK group (P<0. 05). With the increase in soil depth, the trend of soil nitrogen content decline in the three mixed-planting transformation models tended to level off. The alkali-hydrolyzable nitrogen content of the PP group was significantly higher than that of the CK group at different soil depths (P<0. 05). The total carbon content of the PE and PU groups was higher than that of the CK group, and the total carbon content of the PE group was the highest at 40~60 cm. Soil pH and available phosphorus content were not significantly affected by the four treatments (P>0. 05). With the increase in soil depth, the soil organic matter content of all four treatments showed a decreasing trend, except for the 0~10 cm soil layer where there was no significant difference in soil organic matter content among the groups (P>0. 05), the soil organic matter content of the PE, PU, and PP groups was higher than that of the CK group in other soil layers. The research results are of great significance for soil management in forest ecosystems and the restoration of degraded vegetation.

Key words: Horqin sandy land; Artificial forest; Degradation; Transformation; Soil physical and chemical properties

科尔沁沙地是我国北方典型的农牧交错区,也是“三北”建设工程的重点研究区域[1],由于受干旱多风等气候和“三滥”等人为活动影响,近些年生态环境发生了剧烈变化,土地沙化现象仍然突出[2]。

收稿日期:2025-10-28
基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0030-01);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR251008)
作者简介:赵梦迪(1999—),女,硕士研究生,主要从事森林生态学等方面的研究,E-mail:19969011809@163. com;*为通信作者,赵鹏武(1981—),男,博士,高级实验师,主要从事森林生态长期定位等方面的研究,E-mail:zhaopengwu12@163. com;岳永杰(1976—),男,博士,教授,主要从事森林生态学方面的研究,E-mail:wolongyue@126. com

杨树人工林等生态系统退化较为严重[3],出现了大面积的退化人工林,立地条件差,林分生产力水平降低[4],对生态系统功能造成极为严重影响,对此修复退化人工林生态系统显得尤为重要[5]。土壤是森林生态系统的重要组成部分,对维持环境质量及安全发挥着重要作用[6],直接或间接地影响林分的健康状况[7]。土壤理化性质在维持植物生长和能量转化中具有关键作用[8],能够为揭示地上植被与土壤间相互作用和机理及调控森林结构、提高土壤肥力等提供科学依据[9]。特别是在干旱半干旱区,土壤水分是陆地生态系统中水分循环、物质能量交换等过程的关键环节,是制约植物分布与动态变化的限制因子[10-12]。土壤为林分供给水分及养分的能力受到土壤物理性质的直接影响,林木生长促进土壤的改良,降低土壤容重[13],土壤理化性质与许多外部因素有着很强的关联性[14-15],任启文等[16]对小五台山18块土壤样地研究表明,高海拔地区土壤容重较低,而总孔隙度与海拔呈现正相关性,毛管孔隙度与海拔没有显著的相关性。陈传信等[17]研究表明,土壤物理性质不但对土壤水分含量、湿度、温度和生物状况存在影响,还与植被营养物质的吸收效率和生长情况存在关联,是衡量土壤结构和评价土壤质量的关键指标。

本文对科尔沁沙地南缘退化杨树人工林及3种混交改造模式下土壤理化性质开展调查研究,重点分析和探讨了土壤容重、含水率、孔隙度、持水量、全碳、全磷、有效磷、全氮、有机质和pH值等指标动态变化,揭示了退化杨树人工林及不同改造模式下土壤理化性质的变化情况,拟为科尔沁沙地人工林建设和区域退化人工林恢复改造提供理论参考,为“科尔沁沙地歼灭战”及促进农牧业可持续发展等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古敖汉旗位于赤峰市东南部,东部与通辽市奈曼旗接壤,位于科尔沁沙地南缘。地理坐标位于41°42′-42°02′N、119°30′-120°53′E。总体地势为南高北低,海拔高度多为600~800 m,水土流失、风蚀危害比较严重。气候为大陆性气候,干燥少雨,年平均降水量310~460 mm,多集中在7~8月,年蒸发量2 000~2 600 mm,年平均气温5~7 ℃,最低温度-30.9 ℃、最高温度39.7 ℃。主要分布有棕壤、褐土、栗褐土、栗钙土、草甸土、沼泽土、风沙土等。南部为低山丘陵森林草原区,树种以白桦(*Betula platyphylla*)、蒙椴(*Tilia mongolica*)、榆树(*Ulmus pumila*)等为主;北部为风沙坨沼区,主要以柠条(*Caragana korshinskii*)、黄柳(*Salix gordejevii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)等沙生植物为主,主要造林树种有小叶杨(*Populus simonii*)、柠条、羊柴(*Corethrodendron fruticosum*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的选取与分组

本试验样地选取退化杨树人工林的樟子松×山桃林(PE)、云杉×家榆林(PU)、樟子松×杨树林(PP)3种混交改造模式及未改造对照样地(CK)等4个处理。每组处理设置3个50 m×50 m的重复样地,样地基本信息如表1所示:

表1 研究样地信息表

Table 1 Basic Information of Research Plots

改造模式	树种构成	经纬度	平均树高/m	枝下高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/cm	
						东西	南北
PE	樟子松	120°22′47″E,42°30′29″N	2.07	0.82	6.32	75.32	77.49
	山桃林		1.37	0.69	5.20	80.50	78.39
PU	云杉	120°22′43″E,42°30′33″N	1.60	0.19	5.41	87.69	94.97
	家榆林		1.79	0.97	4.65	113.13	116.31
PP	樟子松	120°16′17″E,42°42′28″N	8.79	1.77	16.47	152.20	168.09
	杨树林		3.69	1.59	8.31	202.70	199.03
CK	退化杨树林	119°59′21″E,42°43′59″N	8.62	1.96	24.11	324.81	360.65

1.2.2 土壤样品采集处理

在每个样地内沿对角线设置3个采样点,每个采样点由上至下依照0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 4层采集土壤样品,将同一样地、同一层次的土壤样品混匀成1份土壤样品,采用“四分法”取其中1份;同时使用体积100 cm^3的环刀分层采集环

刀样品。将混合均匀的土样和环刀土样装入塑封袋并做好标记带回实验室。混合均匀的土样晾干后去除植物根系和杂质，研磨后过 0.15 mm 以及 2 mm 筛子筛选，随后装入塑封袋，用于土壤理化性质的测试与分析。

1.2.3　室内样品测试与分析

1）土壤容重测定

将环刀土壤样品放入铝盒之内，置于 105 ℃的恒温烘箱中烘干至恒重，称取干重。具体公式如下：

$$V = \frac{g_1 - g_0}{v} \tag{1}$$

式中：V 表示土壤容重（g/cm^3），g_1 表示环刀干土重，g_0 表示环刀重，v 表示环刀的体积（cm^3）。

2）土壤含水率测定

将环刀土样置于 105 ℃烘箱烘干并反复称量至恒重，具体公式如下：

$$W = \frac{g_2 - g_1}{g_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中：W 为土壤含水率（%），g_2 为土壤鲜重（g）；g_1 为土壤干重（g）。

3）土壤孔隙度测定

采用环刀法进行测定，土壤比重取 2.65 g/cm^3 计算，具体公式如下：

$$N = 1 - \frac{V}{2.65} \tag{3}$$

式中：N 表示土壤孔隙度，V 表示土壤容重（g/cm^3）。

4）土壤全氮含量测定

采用半微量凯氏定氮法测定，将消化液定量转入蒸馏瓶中，沿瓶内壁加入同比例水和所需实验成分，再用硫酸标准溶液滴定。具体公式如下：

$$\omega(\mathrm{N}) = \frac{C(\frac{1}{2}\mathrm{H_2SO_4})(V - V_0) \times 14.0}{m} \tag{4}$$

式中：ω(N) 表示土壤全氮含量（g/kg），V 表示滴定样品 1/2 硫酸标准溶液体积（mL），m 表示烘干土壤质量（g），V_0 表示空白试验所用 1/2 硫酸标准溶液体积（mL），C 表示 0.010 0 mol/L（1/2H_2SO_4）标准溶液；14.0 g/mol 表示氮元素（N）的摩尔质量。

5）土壤全碳含量测定

采用干烧法利用元素分析仪测定全碳含量：

$$\omega(\mathrm{C}) = 100 \times \frac{T \times V}{m} \tag{5}$$

式中：ω(C) 表示土壤全碳含量（g/kg），m 为称样量（g），T 为滴定液对碳的滴定度（g/mL），V 为所用滴定液的体积（mL）。

6）土壤全磷含量测定

采用酸溶-钼锑抗比色法测定，在酸性条件下让土壤中的磷酸与钼酸铵发生反应，从而生成黄色钼酸铵膦酸盐，并通过分光光度计测定其吸光度来计算土壤中磷含量。具体公式如下：

$$\omega(\mathrm{P}) = \frac{\rho \times V \times t}{W \times 10^6} \times 100 \tag{6}$$

式中：ω(P) 表示土壤全磷含量（g/kg），W 表示土样重量（g），ρ 为标准曲线查得的磷质量浓度（mg/L），V 为待测液体积（L），t 为分取倍数。

7）土壤有机质的测定采用重铬酸钾-外加热法；土壤 pH 值的测量运用电极电位法检测（水∶土=1∶1）。

1.2.4　数据处理

数据处理采用 Microsoft Excel 2010 进行初步整理和计算，应用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素方差分析（ANOVA）。

2　结果与分析

2.1　土壤物理性质分析

2.1.1　土壤容重垂直变化

不同试验处理样地土壤容重分析结果如表 2 所示。土层深度 0~10 cm，CK 和 PE 组土壤容重显著高于 PU 和 PP 组（P<0.05），PU 组土壤容重值最低；土层深度 10~20 cm 和 20~40 cm，CK 和 PP 组土壤容重显著高于 PE 和 PU 组（P<0.05）；土层深度 20~40 cm，土壤容重从高到低依次为 PP、CK、PE 和 PU 组，且不同处理容重差异显著（P<0.05）。CK 和 PU 组土壤容重均随土层深度增加而降低；土层深度 40~60 cm，土壤容重显著低于其余深度（P<0.05）；PU 组土壤容重在 40~60 cm 最低，显著低于其余深度（P<0.05）；PP 组土壤容重呈现先上升后下降趋势，土层深度 20~40 cm 显著高于其余各组（P<0.05）；PE 和 PU 组在不同土层深度土壤容重显著低于 CK（P<0.05）。

2.1.2　土壤孔隙度垂直变化

不同试验处理样地土壤总孔隙度分析结果如表 3 所示。0~10 cm 土层各组土壤总孔隙率均无显著性差异（P≥0.05）；土层深度 10~20 cm，PE 和 PU 组孔隙度显著大于 PP 和 CK 组（P<0.05）；4 个处理土壤总孔隙度随深度的增加均无显著性差异（P≥0.05）；PE 和 PU 组在不同土层深度总孔隙度高于 CK 组。

不同实验处理样地土壤毛管孔隙度分析结果见表 4。4 个实验处理不同土层土壤毛管孔隙度均不存在显著差别（P≥0.05）。此外，CK 以及 PE 组的

表2 不同试验处理林分土壤容重垂直变化

Table 2 Vertical variation in soil bulk density in forest stands under different experimental treatments

单位:g·cm^{-3}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	1.42±0.03Aa	1.38±0.05Aa	1.23±0.03Ca	1.29±0.03Bc
10~20	1.41±0.03Aa	1.23±0.01Bb	1.22±0.02Ba	1.43±0.01Ab
20~40	1.41±0.01Ba	1.26±0.01Cb	1.18±0.06Da	1.48±0.02Aa
40~60	1.27±0.04Ab	1.13±0.04Bc	1.07±0.01Cb	1.28±0.01Ac

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

表3 不同试验处理林分土壤总孔隙度垂直变化

Table 3 Vertical variation in soil total porosity in forest stands under different experimental treatments

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	0.44±0.01Aa	0.47±0.02Aa	0.46±0.01Aa	0.46±0.02Aa
10~20	0.42±0.01ABa	0.46±0.05Aa	0.45±0.02ABa	0.40±0.02Ba
20~40	0.41±0.03Aa	0.43±0.04Aa	0.42±0.01Aa	0.38±0.01Aa
40~60	0.42±0.03Aa	0.46±0.02Aa	0.45±0.04Aa	0.41±0.01Aa

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

土壤毛管孔隙度随着土层深度的增加,也均未表现出显著差异(P≥0.05);PP组在土层0~10 cm时土壤毛管孔隙度最大。

表4 不同试验处理林分土壤毛管孔隙度垂直变化

Table 4 Vertical variation in soil capillary porosity in forest stands under different experimental treatments

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	0.41±0.01Aa	0.43±0.01Aa	0.42±0.02Aa	0.44±0.03Aa
10~20	0.40±0.02Aa	0.41±0.04Aa	0.39±0.03Aab	0.38±0.03Ab
20~40	0.39±0.03Aa	0.38±0.04Aa	0.37±0.01Ab	0.36±0.01Ab
40~60	0.40±0.02Aa	0.42±0.01Aa	0.41±0.03Aab	0.38±0.01Ab

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

不同试验处理样地土壤不同层次非毛管孔隙度分析结果如表5所示,土层深度0~10 cm,土壤非毛管孔隙度均无显著性差异(P≥0.05);在不同土层深度,PE和PU组土壤非毛管孔隙度显著高于对照组CK(P<0.05);PP和CK组土壤非毛管孔隙度无显著差异(P≥0.05)。

表5 不同试验处理林分土壤非毛管孔隙度垂直变化

Table 5 Vertical variation in soil non-capillary porosity in forest stands under different experimental treatments

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	0.03±0.01Aa	0.04±0.02Aa	0.03±0.02Aa	0.03±0.01Aa
10~20	0.02±0.00Aab	0.05±0.01Aa	0.06±0.04Aa	0.02±0.00Aa
20~40	0.02±0.01Bb	0.04±0.01Aa	0.05±0.01Aa	0.02±0.01Ba
40~60	0.03±0.01ABab	0.05±0.02Aa	0.04±0.01ABa	0.02±0.01Ba

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

2.1.3 土壤含水率垂直变化

不同试验处理样地不同土层最大持水量分析结果如表6所示。土层深度0~10 cm,PU和PP组土壤最大持水量显著高于CK组(P<0.05);4个试验处理土壤最大持水量随土层深度的增加呈现出先降低后增加的趋势;在不同土层深度,PE与PU组土壤最大持水量均显著高于CK组(P<0.05)。

不同试验处理样地土壤最小持水量分析结果

表 6　不同试验处理林分土壤最大持水量垂直变化

Table 6　Vertical variation in soil maximum water holding capacity in forest stands under different experimental treatments

单位：%

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	31. 19±0. 64Bab	34. 05±2. 72ABb	37. 40±1. 87Aab	36. 01±1. 76Aa
10~20	30. 04±1. 22Bab	37. 17±3. 51Aab	37. 22±1. 27Aab	27. 89±1. 82Bc
20~40	28. 79±1. 87Bb	33. 90±2. 65Ab	35. 43±2. 36Ab	25. 72±0. 48Bc
40~60	33. 22±3. 58Ba	41. 07±3. 02Aa	42. 25±4. 27Aa	31. 86±0. 93Bb

注：不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著（P<0. 05），不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著（P<0. 05）。

如表 7 所示。土层 0~10 cm，PP 组土壤最小持水量明显高于 CK 组（P<0. 05）；在 10~20 cm，PE 组土壤最小持水量明显高于 CK 组（P<0. 05）；在 20~40 cm，PP 组土壤最小持水量明显低于其他组（P<0. 05）。在 40~60 cm，PE、PU 组土壤最小持水量显著高于 PP 和 CK 组（P<0. 05）；在不同土层深度，PU 组的土壤最小持水量高于 CK 组。

表 7　不同试验处理林分土壤最小持水量垂直变化

Table 7　Vertical variation in soil minimum water holding capacity in forest stands under different experimental treatments

单位：%

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	27. 05±0. 69Ba	27. 47±1. 66ABb	30. 36±1. 89ABab	31. 00±2. 65Aa
10~20	25. 17±0. 75BCa	29. 77±3. 35Aab	28. 13±0. 40ABb	23. 50±2. 62Cc
20~40	25. 99±2. 12Aa	25. 95±2. 23Ab	27. 09±1. 70Ab	22. 28±0. 79Bc
40~60	28. 24±2. 37ABa	32. 16±1. 61Aa	32. 94±3. 99Aa	27. 31±0. 32Bb

注：不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著（P<0. 05），不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著（P<0. 05）。

不同土层毛管持水量分析结果如表 8 所示。土层 0~10 cm，PU、PP 组土壤毛管持水量明显大于 CK 组（P<0. 05）；在 10~20 cm 时，PE 和 PU 组土壤毛管持水量明显高于 CK 组（P<0. 05）；在不同土层深度，PE 和 PU 组土壤毛管持水量显著大于 CK 组（P<0. 05）。

表 8　不同试验处理林分土壤毛管持水量垂直变化

Table 8　Vertical variation in soil capillary water holding capacity in forest stands under different experimental treatments

单位：%

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	29. 09±0. 59Ba	31. 26±1. 52ABb	34. 54±2. 03Aab	33. 85±2. 19Aa
10~20	28. 29±1. 48BCa	33. 42±3. 39Aab	32. 34±2. 18ABb	26. 35±2. 02Cc
20~40	27. 72±2. 29ABa	30. 54±2. 82Ab	31. 38±1. 85Ab	24. 37±0. 56Bc
40~60	31. 21±2. 90Ba	36. 78±1. 28Aa	38. 30±3. 46Aa	30. 00±0. 99Bb

注：不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著（P<0. 05），不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著（P<0. 05）。

2. 2　土壤化学性质分析

2. 2. 1　土壤全氮含量垂直变化

土壤中的氮元素是植物生长的关键元素，全氮含量是土壤中各类氮含量的总和，是衡量土壤营养供给的重要参量。不同试验处理土壤全氮含量结果分析如表 9 所示。土层深度 0~10 cm，PE 组土壤全氮含量明显高于 CK 组（P<0. 05）。随着土壤深度的增加，CK 组相对 PE、PU 和 PP 组土壤全氮含量呈明显下降趋势（P<0. 05）；在不同土层深度，PE、PU 和 PP 组土壤全氮含量显著高于 CK 组（P<0. 05），其中 PE 和 CK 组在不同土层深度全氮含量的差异最为明显（P<0. 05）。

碱解氮能反映土壤的供氮能力，能够准确反映出土壤氮素的供应情况。4 个试验处理不同土层深

表9 不同试验处理林分土壤全氮含量垂直变化

Table 9 Vertical variation in soil total nitrogen content in forest stands under different experimental treatments

单位:g·kg^{-1}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	0.62±0.02Ba	0.68±0.04Aa	0.64±0.01ABa	0.66±0.02ABa
10~20	0.46±0.06Cb	0.62±0.01Ab	0.51±0.02BCb	0.57±0.02ABb
20~40	0.31±0.02Cc	0.53±0.03Ac	0.47±0.02Bc	0.54±0.01Ac
40~60	0.29±0.05Bc	0.48±0.02Ad	0.42±0.01Ac	0.45±0.04Ad

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

度碱解氮含量分析如表10所示。土层深度0~10 cm,PP组土壤碱解氮含量显著高于CK组(P<0.05),PE、PU组土壤碱解氮含量显著低于CK组(P<0.05)。PE组在不同土层深度差异显著(P<0.05),可能与退化林不同改造模式对土壤层扰动和林木不同配置模式有关。不同土层深度PP组碱解氮含量显著高于CK组(P<0.05)。

表10 不同试验处理林分土壤碱解氮垂直变化

Table 10 Vertical variation in soil alkali-hydrolyzable nitrogen content in forest stands under different experimental treatments

单位:mg·kg^{-1}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	43.92±1.17Ba	32.44±0.98Ca	33.03±1.68Ca	47.81±0.59Aa
10~20	16.17±0.53Cc	26.37±1.26Bb	28.16±2.81Bbc	31.67±1.97Ab
20~40	25.66±1.72Bb	21.40±1.37Cc	30.45±2.03Aab	32.62±1.97Ab
40~60	18.16±1.36Bc	17.35±1.97Bd	25.02±0.48Ac	20.06±1.52Bc

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

2.2.2 土壤全碳含量垂直变化

不同试验处理土壤全碳含量分析结果如表11所示。土层深度0~10 cm,PP组土壤中全碳含量显著低于CK组(P<0.05);土层深度40~60 cm,PE和PP组土壤全碳含量显著高于CK和PU组(P<0.05),且CK与PU组无显著性差异(P≥0.05)。土层深度40~60 cm,PE组全碳含量显著高于PU、PP和CK组(P<0.05),且PE组全碳含量在土层40~60 cm最大。PE组土壤全碳含量随土层深度增加有显著增加的趋势(P<0.05),而PP组呈现出先降低后增加的趋势。在不同土层深度,PE和PU组全碳含量高均于CK组。

表11 不同试验处理林分土壤全碳含量垂直变化

Table 11 Vertical variation in soil total carbon content in forest stands under different experimental treatments

单位:g·kg^{-1}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	8.08±0.45ABa	9.54±1.14Ab	8.64±1.15ABa	7.32±0.88Bab
10~20	6.16±0.90Bb	10.20±0.96Ab	6.65±0.42Bab	6.83±0.27Bb
20~40	5.64±0.48Bb	11.17±0.35Ab	6.27±0.49Bb	7.10±1.55Bb
40~60	5.14±0.66Cb	15.20±0.69Aa	5.31±0.38Cb	9.36±1.31Ba

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

2.2.3 土壤全磷含量垂直变化

磷元素是林分生长发育不可或缺的元素之一,在植物体的组织发育、蛋白质合成和能量转化中发挥着关键作用,对植物生长有着重要意义。不同试验处理土壤全磷分析结果如表12所示。随着土层深度增加,PE、PU和PP组的全磷含量呈明显降低的趋势(P<0.05)。在不同土层深度下,4个处理土壤全磷含量无明显差异(P≥0.05)。

不同试验处理土壤有效磷分析结果如表13所示。试验处理土壤有效磷含量随不同土层深度增

表 12　不同试验处理林分土壤全磷含量垂直变化

Table 12　Vertical variation in soil total phosphorus content in forest stands under different experimental treatments

单位：g·kg^{-1}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	0. 18±0. 01Ca	0. 20±0. 00Ba	0. 22±0. 01Aa	0. 23±0. 01Aa
10~20	0. 16±0. 00Ca	0. 19±0. 01Bb	0. 21±0. 01Ab	0. 20±0. 00Ab
20~40	0. 16±0. 01Ba	0. 18±0. 01Ab	0. 19±0. 01Ac	0. 19±0. 00Ac
40~60	0. 16±0. 00Ba	0. 17±0. 00Ac	0. 17±0. 00Ad	0. 17±0. 00Ad

注：不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著（P<0. 05），不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著（P<0. 05）。

加呈现出先降低后升高的趋势。在土层 10~20 cm 和 20~40 cm 时，PE、PU 和 PP 组土壤有效磷含量均显著高于 CK 组（P<0. 05）。

表 13　不同试验处理林分土壤有效磷含量垂直变化

Table 13　Vertical variation in soil available phosphorus content in forest stands under different experimental treatments

单位：mg·kg^{-1}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	2. 32±0. 25Ba	2. 87±0. 51ABa	2. 42±0. 08Ba	3. 41±0. 44Aa
10~20	1. 24±0. 19Cc	2. 06±0. 25Bb	2. 03±0. 17Bb	2. 69±0. 39Ab
20~40	1. 40±0. 20Bbc	1. 99±0. 27Ab	2. 33±0. 13Aab	2. 07±0. 16Ab
40~60	2. 06±0. 64Aab	2. 06±0. 13Ab	2. 52±0. 33Aa	2. 25±0. 20Ab

注：不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著（P<0. 05），不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著（P<0. 05）。

2. 2. 4　土壤 pH 值垂直变化特征

土壤 pH 值是考察土壤理化性质的重要指标，与植物吸收土壤养分效果有较高的相关性，能够有效影响土壤肥力。不同试验处理土壤 pH 值分析结果如表 14 所示。土层深度 0~10 cm，PE 和 PP 组土壤 pH 值显著高于 CK 组（P<0. 05）；除 PU 与 CK 组无显著性差异外（P≥0. 05），PE 和 PP 组相对 CK 组 pH 值有显著上升的趋势（P<0. 05）。

表 14　不同试验处理林分土壤 pH 值垂直变化

Table 14　Vertical variation in soil pH in forest stands under different experimental treatments

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	8. 30±0. 13Ba	8. 51±0. 03Aa	8. 27±0. 09Bb	8. 48±0. 05Ab
10~20	8. 54±0. 28Aa	8. 56±0. 08Aa	8. 48±0. 13Aab	8. 50±0. 09Aab
20~40	8. 51±0. 13Aa	8. 61±0. 09Aa	8. 57±0. 15Aa	8. 60±0. 05Aa
40~60	8. 53±0. 17Aa	8. 58±0. 06Aa	8. 70±0. 10Aa	8. 62±0. 04Aa

注：不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著（P<0. 05），不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著（P<0. 05）。

2. 2. 5　土壤有机质含量垂直变化

不同试验处理土壤有机质含量分析结果如表 15 所示。土壤有机质大量储存在土壤表层（0~20 cm），PP 组土壤有机质最高。土层深度 40~60 cm，CK 组土壤有机质含量明显低于 PE、PU 和 PP 组（P<0. 05）。随土层深度增加，4 个处理土壤有机质含量均呈现下降趋势；除土层 0~10 cm 各组土壤有机质含量无显著差异外（P≥0. 05），其他土层 PE、PU 和 PP 组土壤有机质含量均高于 CK 组。

3　讨论与结论

3. 1　讨论

4 种不同改造模式对土壤的物理性质有显著影响，樟子松和山桃林（PE）、云杉和家榆林（PU）混交模式的土壤容重均显著低于退化杨树人工林（CK），表明退化杨树人工林土壤密度大，透气性差，林分的改造促进了土壤团粒结构的形成，因而降低了容重。土壤容重作为衡量土壤物理性质的重要指标，

表15 不同试验处理林分土壤有机质含量垂直变化

Table 15 Vertical variation in soil organic matter content in forest stands under different experimental treatments

单位:g·kg^{-1}

深度/cm	CK	PE	PU	PP
0~10	11.92±0.33Aa	11.13±0.55Ba	11.17±0.19Ba	12.12±0.14Aa
10~20	7.74±2.13Bb	9.49±0.11ABb	8.98±0.65ABb	10.49±0.32Ab
20~40	6.76±0.93Bb	8.31±0.25Ac	7.20±0.19Bc	9.15±0.28Ac
40~60	5.68±0.64Cb	7.12±0.17ABd	6.65±0.14Bd	7.57±0.42Ac

注:不同大写字母代表同一土层不同处理之间差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一处理不同土层之间差异显著(P<0.05)。

反映土壤压实程度,在很大程度上影响土壤透气性和持水能力,对树木根系的生长有显著影响[18]。土壤孔隙度衡量土壤的贮水性能和肥力水平[18],关系着植物生长环境及土壤的水分状况[19]。樟子松和山桃林(PE)、云杉和家榆林(PU)混交模式的总孔隙度和最大持水量均显著高于退化杨树人工林(CK)。本研究中,PE和PU组混交模式的总孔隙度和最大持水量均显著高于CK组,且与PE和PU组混交模式的土壤容重均显著低于CK组相对应,表明混交模式改造降低土壤紧实度并增加孔隙度,从而提升土壤持水能力。CK组容重高,土壤更为紧实,水分入渗与贮存条件受限,导致土壤含水率相对偏低且保水保肥能力较弱,不利于退化人工林恢复。不同林分改造模式与土壤容重、含水率与孔隙度之间密切相关[20]。有研究表明,通过对林分改造,改良了土壤结构,树木根系可以吸收深层土壤水分,促进了植被恢复,并进一步稳定了土壤水分,避免水分流失[21],与本文结果一致。

退化林改造促进了土壤的化学性质的改善,退化杨树人工林(CK)土壤全氮及土壤有机质含量均随土层厚度增加呈明显下降趋势,而混交改造模式下的土壤全氮及土壤有机质含量下降的趋势均趋于平稳,这是因为退化林通过混交改造改善了林下微环境,显著提高了林下植被生物量和凋落物产量,有效促进了凋落物分解和植被恢复,促进了土壤养分积累,林分改造提高了生态效益[22]。樟子松和山桃林(PE)、云杉和家榆林(PU)混交改造模式的土壤全碳含量均显著高于退化杨树人工林(CK),不同处理对土壤全磷含量和pH无显著影响。林分混交改造对土壤碳含量影响显著,提升了土壤养分[23],这与张浩等[24]对人工林改造提高林分土壤碳含量,土壤碳含量在改善土壤稳定性与土壤肥力中具有重要潜力的研究结论一致,而pH值和有效磷的含量对林分改造及物种多样性变化影响较小[25]。林分改造改善土壤有机质的积累,有利于促进土壤肥力以及生态系统的稳定[26]。

3.2 结论

1)科尔沁沙地退化杨树人工林PE及PU组改造显著减缓土壤肥力退化,有效优化土壤保水及透气能力,PE及PU组土壤容重在不同土层深度显著低于CK组(P<0.05),而PE及PU组的土壤孔隙度及土壤含水率在不同土层深度显著高于CK组(P<0.05)。

2)随土层深度增加,PE、PU改造的土壤全氮和PU改造的土壤有机质含量相对稳定,PE及PU组土壤全碳含量均显著高于CK组(P<0.05),CK组土壤全氮和有机质含量均呈明显下降趋势(P<0.05)。

3)不同改造处理对土壤pH值和有效磷含量无显著影响(P≥0.05)。研究结果对退化森林生态系统的管理、植被恢复与重建具有重要意义。

参考文献:

[1] 郭欣宇. 奈曼旗不同带间距小叶杨防护林植被-土壤特征及耦合关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

[2] 蒋德明,曹成有,李雪华,等. 科尔沁沙地植被恢复及其对土壤的改良效应[J]. 生态环境,2008,17(3):1135-1139.

[3] 伏媛媛,郝龙飞,岳永杰,等. 科尔沁沙地不同林龄杨树人工林土壤微生物群落特征[J]. 东北林业大学学报,2025,53(7):91-98+107.

[4] 郭江涛,彭晶晶,马 鑫,等. 北方沙地杨树人工林对常规与滴灌施肥的响应[J]. 林业科学,2025,61(10):135-145.

[5] 吕欣晔,岳永杰,赵鹏武,等. 不同改造模式的退化小叶杨人工林土壤生态化学计量特征[J]. 东北林业大学学报,2025,53(6):115-122.

[6] 彭海英,童绍玉,刘新有. 西双版纳不同年限橡胶林对土壤生产力的影响[J/OL]. 西南林业大学学报(自然科学),2025:1-8.(2025-11-11). https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1218.S.20251110.1848.002.html.

[7] 张彦君，滑思涵，郭　瑞，等. 秦岭不同森林类型土壤健康变化特征及驱动因素分析[J/OL]. 生态学报，2025：1-14.（2025-10-15）. https://link. cnki. net/doi/10. 20103/j. stxb. 202504271004.

[8] 李世杰，魏天兴，于　欢，等. 晋西黄土区刺槐林群落结构与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持研究，2025，32(6)：132-140+150.

[9] 邱新彩，彭道黎，李伟丽，等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J]. 应用与环境生物学报，2018，24(2)：221-229.

[10] XIA J，NING L K，WANG Q，et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change[J]. Climatic Change，2017，144(3)：549-563.

[11] 杨大文，丛振涛，尚松浩，等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. 水利学报，2016，47(3)：390-397.

[12] 邱　扬，傅伯杰，王　军，等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报，2001，12(5)：715-720.

[13] 辛鸿斌. 科尔沁沙地主要树种防护林土壤微生物群落结构研究[D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2024.

[14] GWAK Y，KIM S. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope[J]. Hydrological Processes，2017，31(2)：431-445.

[15] 孟禹彤. 微塑料迁移对黑土区土壤理化性质和水稻生长状况的影响研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2025.

[16] 任启文，王　鑫，李联地，等. 小五台山不同海拔土壤理化性质垂直变化规律[J]. 水土保持学报，2019，33(1)：241-247.

[17] 陈传信，张永强，薛丽华，等. 伊犁河谷栗钙土区不同产量雨养麦田土壤物理性质比较研究[J]. 土壤通报，2019，50(2)：304-309.

[18] 刘　妮，李　浪，吴　迪. 石漠化山地刺梨园土壤理化性质分析[J]. 贵州科学，2025，43(4)：63-65.

[19] 张国庆. 鲁西黄泛平原区三种林下种养模式下的杨树人工林土壤特征分析[D]. 泰安：山东农业大学，2024.

[20] 张　燕. 云南乌蒙山国家级自然保护区主要植被类型生态化学计量特征[D]. 昆明：云南师范大学，2023.

[21] 齐向东，王昭才，弓　瑞. 内蒙古大青山前坡油松人工林生长特征研究[J]. 内蒙古林业科技，2021，47(1)：28-33.

[22] 游秀花，蒋尔可. 不同森林类型土壤化学性质的比较研究[J]. 江西农业大学学报，2005，27(3)：357-360.

[23] 何雨璇. 不同混交模式对杉木林下植被和土壤性质的影响[D]. 长沙：中南林业科技大学，2024.

[24] 张　浩，莫罗坚，陈葵仙，等. 香港人工林改造对林分土壤理化性质、土壤微生物生物量及土壤酶活性的季节影响[J]. 生态环境学报，2016，25(12)：1937-1944.

[25] 张瀛澜. 不同复垦模式的刺槐人工林对土壤理化性质及微生物的影响研究[D]. 太原：山西大学，2021.

[26] 王小燕，王　如，廖立国，等. 海南热带雨林国家公园典型人工林近自然改造对土壤理化性质的影响[J]. 国家公园（中英文），2025(6)：364-376.