

不同造林模式下火烧迹地的土壤修复效果及植物多样性变化

陈小雪, 李红丽, 董智, 陈鹏, 仇苏倩, 高娅

(山东农业大学林学院, 山东泰山森林生态系统国家定位研究站, 山东 泰安 271018)

摘要: 以威海仙姑顶中度火烧迹地人工更新后的麻栎—樱花—刺槐混交林(MYC)、麻栎—黑松—五角枫混交林(MHW)、麻栎—黑松—黄栌混交林(MHH)和麻栎—黑松—臭椿混交林(MHC)为研究对象, 对4种不同造林模式进行土壤的定量分析和物种多样性调查, 以自然更新林地(CK)作为对照, 对比分析不同造林模式对火烧迹地土壤修复效果以及林下植被更新状况。结果表明: (1) MHH在0—40 cm土层内土壤容重最小, 土壤通气性能最佳, 土壤持水状况最好, MHC次之, MYC最差, 但均与CK存在显著差异($P < 0.05$); (2) MHH在0—40 cm土层内土壤有机碳、碳氮比(C/N)、全磷、全钾、速效钾含量均为最高, MHC在0—40 cm土层内全氮、速效磷含量最高, MYC和MHW的土壤有机碳、碳氮比(C/N)、全磷、全钾与CK无显著差异($P > 0.05$); (3) MHH的Margalef指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数以及Pielou指数均处于较高水平; (4) 综合分析后得出, MHH对中度火烧迹地土壤修复效果最佳, 林下植被更新速度最快, MHC次之。MYC和MHW对火烧迹地土壤物理性质改良明显, 但在土壤养分和林下植物更新方面并无明显作用。

关键词: 火烧迹地; 造林模式; 土壤理化性质; 植被更新; 物种多样性

中图分类号: S714.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0332-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.049

Effects of Soil Remediation and Changes of Plant Diversity in Burned Areas Under Different Afforestation Patterns

CHEN Xiaoxue, LI Hongli, DONG Zhi, CHEN Peng, QIU Suqian, GAO Ya

(Forestry College of Shandong Agricultural University, Mountain Tai Forest

Ecosystem Research Station of State Forestry Administration, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Taking *Quercus acutissima*-*Cerasus*-*Robinia pseudoacacia* mixed forest (MYC), *Quercus acutissima*-*Pinus thunbergii*-*Acer mono* mixed forest (MHW), *Quercus acutissima*-*Pinus thunbergii*-*Cotinus coggygria* mixed forest (MHH), and *Quercus acutissima*-*Pinus thunbergii*-*Ailanthus altissima* mixed forest (MHC) grown in the burned area of Weihai as research object, soil properties and species diversity were surveyed under four different afforestation patterns with naturally updated woodland (CK) as the control. The effects of different afforestation modes on soil remediation and the status of subforest vegetation renewal were analyzed. The results showed that: (1) MHH had the lowest soil bulk density in 0—40 cm soil layer, the best soil aeration performance, and the best soil water retention. MHC was the second and MYC the worst. All of these three were different significantly from CK ($P < 0.05$); (2) The soil organic carbon, carbon nitrogen ratio (C/N), total phosphorus, total potassium and available potassium contents in MHH were the highest in 0—40 cm soil layer. MHC had the highest total nitrogen and available phosphorus contents in 0—40 cm soil layer. There was no significant difference in soil organic carbon, carbon/nitrogen ratio (C/N), total phosphorus, total potassium and CK between MYC and MHW ($P < 0.05$). (3) MHH's Margalef index, Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou index were relatively higher; (4) After comprehensive analysis, it could be concluded that MHH had the best soil remediation effect on moderately burned land, and the regeneration rate of understory vegetation was the fastest, followed by MHC. MYC and MHW could improve soil physical properties obviously, but had no obvious effect on soil nutrients and understory plant regeneration.

收稿日期: 2018-11-27

资助项目: 山东省林业科技创新项目(LYCX03-2018-17); 欧洲投资银行贷款山东沿海防护林工程监测与评价项目(SCSFP-JP)

第一作者: 陈小雪(1994—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事水土流失综合治理研究。E-mail: chenxx12@126.com

通信作者: 李红丽(1972—), 女, 内蒙赤峰人, 教授, 硕士生导师, 主要从事荒漠化防治与植物恢复研究。E-mail: lhl@sdau.edu.cn

Keywords: burned area; afforestation pattern; soil physical and chemical properties; vegetation update; species diversity

林火是森林生态系统中最活跃的干扰之一,可在短时间使森林土壤理化性质发生剧烈改变,影响森林生态系统的养分循环和再分配^[1]。林火作为一种自然地理现象,兼具破坏性和生态性双重特性^[2]。有学者^[3]认为,火干扰后森林土壤温度上升,导致土壤矿物热变化,造成有机碳及养分流失。同时林火还会影响局部生境的植被结构与动态,破坏森林生态系统环境平衡^[4-5]。还有学者^[2]认为,林火干扰是森林系统更新的影响因子之一,适当频率和强度的火烧,对森林地力的维持和土壤养分的恢复有重要作用。但不管林火对森林生态环境产生的是正面还是负面作用,森林火烧迹地生态系统功能恢复已成为关注的焦点^[6]。人工更新可以极大缩短火烧后植被恢复所需的时间,使其越过某些演替阶段,直接恢复到针叶林或针阔混交林阶段^[7],对火烧迹地森林重建具有重要意义。

土壤是森林生态系统重要的组成部分,为植物的生长提供了生长发育场所和必需的矿质养分^[8],土壤养分的含量以及空间分布特征等直接影响森林的更新过程^[9]。火干扰后通常林地灌草层恢复最为迅速,灌草层更新的进程是反映森林干扰后植被恢复程度的有效指标^[5],而林下植被又可以促进土壤养分循环、防止土壤侵蚀,是整个森林群落重要的组成部分之一^[10]。正确选择造林模式是实现土壤恢复、建立稳定植物群落的重要手段,但目前我国对火烧迹地的研究主要集中在东北大兴安岭等较大林区,对松类占优势的胶东丘陵区火烧迹地的植被恢复研究仍处于起步阶段^[11],对火烧迹地植被恢复与森林经营缺乏成熟的经验与模式^[12],致使火烧迹地植被趋于退化。因此,探索火烧迹地人工造林更新模式,阐明不同更新模式对林地生态系统的作用效果,对促进火烧迹地林地生态系统的恢复与健康发展具有重要意义。基于此,本研究以威海仙姑顶中度火烧迹地为研究区域,在保留原存活树种的基础上,以天然更新林地(对照)与4种不同造林更新模式为研究对象,分析人工更新后各造林模式对火烧后土壤改良效果以及林下植被群落丰富度、多样性和均匀度的影响,以期为该地区火烧迹地的恢复和经营提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省威海市环翠区望岛村西北部的仙姑顶,未过火前为以赤松(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)和麻栎(*Quercus acutissima* Caruth.)为主混交类型的天然次生林,地理坐标 122°

06'20"—122°06'31"E,37°27'20"—37°27'51"N,属暖温带半湿润东亚季风气候区,由于濒临渤海,表现出海洋性气候特点。年平均气温 11.4~12.1℃,年平均降水量 766.7 mm,比相似纬度地区偏多,降水分布不均匀,多集中于 6—9 月,年蒸发量为 1 930.7 mm,年日照时间 3 000~4 070 h,全年无霜期 194~221 d。威海仙姑顶 2014 年“5·29”大火中度火烧迹地过火面积 200 hm²,林木死亡率达 60%,存活林木主要为麻栎及少量刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.),赤松因地下火侵扰基本全部死亡。

2015 年春季,对研究区中度火烧迹地进行烧死木伐倒截断处理,保留存活的麻栎林,对死亡的麻栎进行补植,选取 4 块坡度、坡向、海拔和火烧前植被结构基本一致(消除不同立地条件对灌草层更新的影响)的典型地段分别补植樱花(*Cerasus* Sp.)刺槐混交林、黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)五角枫(*Acer mono* Maxim.)混交林、黑松黄栌(*Cotinus coggygria* Scop.)混交林和黑松臭椿(*Ailanthus altissima* Swingle.)混交林,造林时各树种树龄均为 2 年。自然更新林地(CK)仅进行烧死木伐倒截断处理,使其自然更新,CK 及各补植林地采取相同的修剪等抚育措施,2018 年调查不同造林模式内树种高度、根径、活枝下高和林下盖度(表 1)。

1.2 样地调查与土壤采集

2018 年 8 月,在中度火烧迹地 4 种造林地及未进行造林自然更新林地(CK)的上中下 3 个不同坡位设置 3 个面积为 20 m×20 m 的乔木样方,在样方内以“S”形均匀布设 3 个面积 2 m×2 m 灌草层样方,共设置乔木样方 15 个,灌草样方 45 个。调查样方内植物群落组成与结构,详细记录每种植物的种名、高度、密度、盖度,并计算植物物种多样性指数。然后在各样方内随机选取 3 个取样点,去除表层的枯枝落叶,挖掘土壤剖面,用环刀分别取原状土壤,带回实验室进行各项物理指标的测定。由于研究区土层较薄,仅取 2 层土样,在每个取样点分别用土钻取 0—20,20—40 cm 的土样带回实验室,将同一块地相同土层采集的土样等比例混合,然后风干、去杂、过筛后进行土壤化学指标的测定。

1.3 土壤理化性质的测定

土壤容重、毛管孔隙度测定采用环刀浸水法;土壤自然含水率采用铝盒烘干法;土壤有机碳测定采用重铬酸钾外加热氧化法;土壤全氮量测定采用半微量凯氏定氮法;全磷测定采用硫酸—高氯酸—钼锑抗比色法;土壤速效磷测定采用碳酸氢钠浸提法;全钾测定采用碱融—火焰光度计法;土壤速效钾测定采用醋

酸铵浸提—火焰光度法^[13]测定。以上各项指标每个样品测定 3 次重复。

表 1 样地基本情况调查

造林模式	树种	树高/ m	根径/ cm	活枝 下高/m	林下植被 盖度/%	土壤 pH	造林 配比
MYC	麻栎	6.60	12.18				
	樱花	2.09	4.29	0.35	37	6.41	4 : 3 : 3
	刺槐	2.19	2.11	0.30			
MHW	麻栎	6.02	10.36				
	黑松	2.02	4.42	0.35	23	6.85	4 : 3 : 3
	五角枫	2.07	1.94	0.21			
MHH	麻栎	6.73	11.53				
	黑松	1.96	3.56	0.35	41	6.02	4 : 3 : 3
	黄栌	2.38	2.13	0.20			
MHC	麻栎	6.48	11.55				
	黑松	1.84	3.18	0.33	32	6.09	4 : 3 : 3
	臭椿	2.29	2.12	0.42			
CK	麻栎	7.19	11.86			6.11	

1.4 数据处理与分析

重要值(IV)以相对密度(RD)、相对盖度(RC)和相对高度(RH)计算,即 $IV=RD+RC+RH$ 。

林下植物群落多样性采用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数进行分析计算,计算公式为:

Margalef 丰富度指数 $= (S-1)/\lg N$

Shannon-Wiener 多样性指数 $= -\sum P_i \ln P_i$

Simpson 多样性指数 $= 1 - \sum P_i^2$

Pielou 均匀度指数 $= H/\ln S$

式中:S 为群落中的总物种数(个);N 为所有物种个体总数(个); $P_i=N_i/N$, P_i 为第*i* 种的相对重要值, N_i 为第*i* 个物种的个体总数(个)。

数据分析采用 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行方差分析,采用单因素(one way ANOVA)和最小显著极差法(LSD)进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),用字母标记法表示各组数据间的差异显著性,

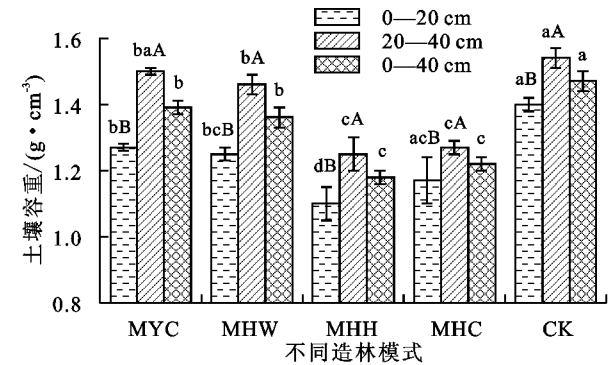


图 1 不同造林模式容重和土壤孔隙度

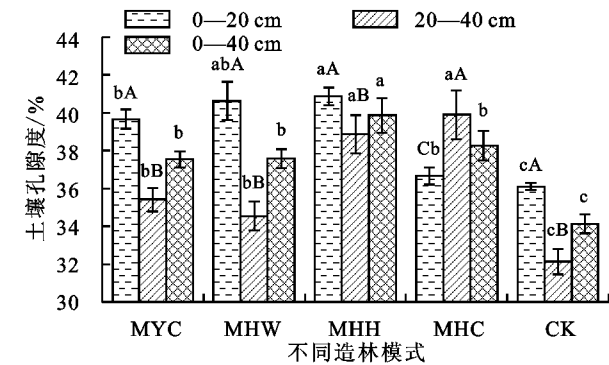
土壤通气性是土壤的重要特性之一,生产实践中常用土壤的孔隙度作为衡量土壤通气性能好坏的指标。从图 1 可以看出,其中 MHH 土壤孔隙度最大,与其他造林地差异显著($P<0.05$),表层土壤孔隙度

采用 Origin 8.0 软件作图,图中数据为平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 不同造林模式对火烧迹地土壤物理性质影响

2.1.1 土壤容重和土壤通气性能的变化 从图 1 可以看出,MHH 的土壤容重最小,0—40 cm 土层土壤容重为 1.10~1.25 g/cm³,比 CK 降低了 23.20~27.27%,MHC 次之为 1.17~1.27 g/cm³,2 种造林模式之间没有显著差异($P>0.05$),均对火烧迹地有较好的修复作用,而 MYC 最差,土壤容重为 1.27~1.50 g/cm³,比 CK 降低了 2.67~10.24%。人工更新后 4 种造林模式土壤容重均低于 CK,且除 MYC 的 20—40 cm 土层外,其他造林模式各土层均与 CK 差异显著($P<0.05$),而同一造林模式不同土层之间土壤容重也有显著差异($P<0.05$),0—20 cm 均低于 20—40 cm 土层,说明不同造林模式均可降低土壤容重,改良土壤结构,且对表层容重的改良效果优于下层。



为 40.87%,20—40 cm 土壤孔隙度为 38.86%,与 CK 相比分别提高了 13.18%和 20.91%,土壤通气性能良好,对林地土壤改良效果最明显。其余 3 种造林地 0—40 cm 平均土壤孔隙度介于 37.54~38.28%,且彼此之间差

异不显著($P>0.05$),表明除 MHH 外,其余 3 种造林模式提高土壤孔隙度、改善土壤的通气状况的能力差别不大,但均与 CK 差异显著($P<0.05$)。从土壤纵剖面来看,各造林地均为表层土壤孔隙度最大。总体上,4 种造林模式对火烧迹地土壤容重和通气性能改良最佳的是 MHH,最差的是 MYC。

2.1.2 不同造林模式土壤持水性能 从图 2 可以看出,人工更新后 4 种造林模式土壤持水性能有显著提升,土壤毛管持水量、土壤毛管贮水量、土壤饱和含水量、土壤饱和贮水量相较于 CK 均有不同程度的提高。各造林模式土壤毛管最大持水量和土壤毛管贮水量均呈现出一定的垂直分布特性,0—20 cm 层均高于 20—40 cm 层,除 MHH 上下两层土壤毛管贮水量差异不显著外,其他各林型差异均达到显著水

平($P<0.05$)。各造林模式 0—40 cm 土层平均毛管最大持水量为 19.89~28.56%,平均毛管贮水量为 52.62~66.86 mm,4 种林型均为 MHH 土壤毛管最大持水量和土壤毛管贮水量最高,0—40 cm 土层分别为 28.56%和 66.86 mm,MHW 最低,分别为 19.89%和 52.62 mm,各造林模式土壤毛管最大持水量和土壤毛管贮水量均显著高于 CK($P<0.05$)。各造林模式各层土壤饱和含水量介于 23.63~37.20%,在 0—40 cm 土层中,MHH 平均土壤饱和含水量最高为 34.09%,MHC 次之为 27.41%,MYC 和 MHW 最低且差异不显著($P>0.05$);各造林模式各层土壤饱和贮水量介于 69.08~81.74 mm,在 0—40 cm 土层中,MHH 土壤饱和贮水量最大为 79.73 mm,其他造林模式差异不显著($P>0.05$),但均显著高于 CK($P<0.05$)。

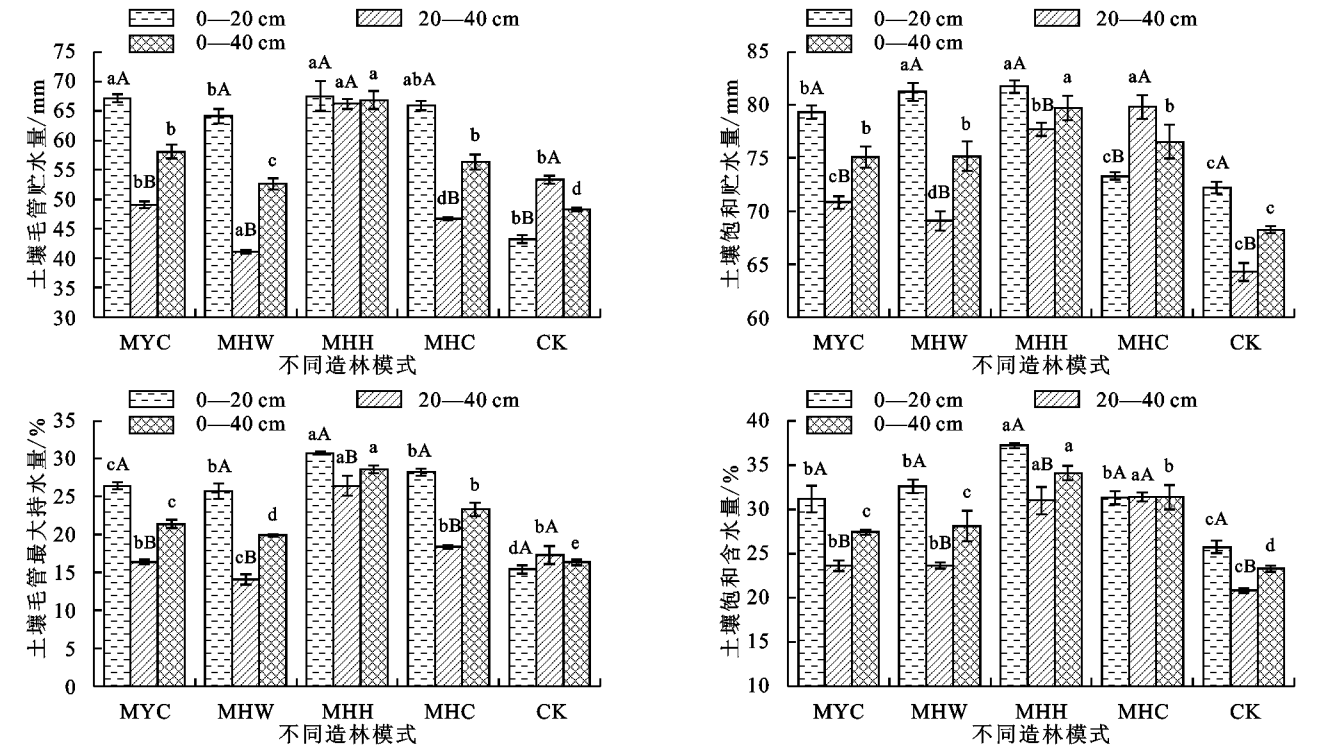


图 2 不同造林模式土壤持水状况

2.2 不同造林模式对火烧迹地土壤养分的影响

2.2.1 土壤碳氮含量变化 从表 2 可以看出,0—40 cm 土层内,4 种造林模式土壤有机碳含量为 MHH (14.89 g/kg)>MHC(14.10 g/kg)>MHW(4.90 g/kg)>MYC(4.14 g/kg),人工更新后各林地土壤有机碳含量较 CK 有所提高,但除 MHH 和 MHC 外,其余与 CK 差异不显著($P>0.05$);从整个土壤剖面来看,除 MHW 外,其余各林地土壤有机碳含量均为 0—20 cm>20—40 cm 土层,表现出随土层深度递减的趋势,而 MHW 中由于五角枫属于深根系树种,主侧根系发达,植物分泌物及残体主要分布在 20—40 cm 土层内,所以下层有机碳含量高于表层^[14]。各林地 0—40 cm 土层内土壤全氮量为 0.46~1.33 g/kg,其中 MHC 平均含量最高为 1.24

g/kg,MHH 次之为 1.08 g/kg,MYC 最低为 0.51 g/kg,且均与 CK 差异显著($P<0.05$)。土壤有机碳氮含量的比值(C/N)是反映土壤养分利用效率的重要指标^[15],各造林模式 0—20 cm 土层内土壤碳氮比(C/N)为 9.10~14.97,20—40 cm 土层内碳氮比(C/N)为 5.25~12.66,从垂直方向看,0—20 cm 土层碳氮比(C/N)普遍高于 20—40 cm 土层;从各林地水平方向看,0—40 cm 土层内 MHH 碳氮比(C/N)最高,上下两层分别为 14.97 和 12.66,其次为 MHC,上下两层分别为 11.31 和 11.39,表明这 2 种造林模式有机质供肥状况优越,土壤的碳源氮素比例合理,更有利于保肥保墒^[16]。但 MYC 和 MHW 与 CK 之间无显著差异($P>0.05$),碳氮比(C/N)为 8.35~8.85。

表 2 不同造林模式土壤碳氮含量

指标	林分类型	0—20 cm	20—40 cm	0—40 cm
土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)	MYC	5.33±0.26cA	2.94±0.19cB	4.14±0.32bc
	MHW	4.16±0.27cB	5.64±0.35bA	4.90±0.51b
	MHH	16.33±1.39aA	13.45±0.74aB	14.89±0.76a
	MHC	14.99±0.64bA	13.20±0.50aB	14.10±0.29a
	CK	4.16±0.12cA	2.86±0.27cB	3.51±0.19c
土壤有机氮/(g·kg ⁻¹)	MYC	0.47±0.01cB	0.56±0.03dA	0.51±0.01c
	MHW	0.46±0.02cB	0.66±0.01cA	0.56±0.02c
	MHH	1.09±0.06bA	1.06±0.03bA	1.08±0.05b
	MHC	1.33±0.01aA	1.16±0.02aB	1.24±0.02a
	CK	0.41±0.05cA	0.39±0.02eA	0.40±0.04d
土壤碳氮比(C/N)	MYC	11.45±0.78bA	5.25±0.23eB	8.35±0.43c
	MHW	9.10±0.29cA	8.60±0.12cA	8.85±0.19c
	MHH	14.97±0.45aA	12.66±0.28aB	13.81±0.38a
	MHC	11.31±0.53bA	11.39±0.19bA	11.35±0.24b
	CK	10.27±1.09bA	7.26±0.30dB	8.76±0.68c

注:表中不同小写和大写分别代表同一土层不同造林模式和同一造林模式不同土层之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2.2 土壤全量养分含量变化 由表 3 可知,4 种造林模式土壤全磷含量为 0.192 8~0.315 8 g/kg,CK 为 0.186 3~0.261 6 g/kg,其中 MHH 全磷含量最高,0—40 cm 土层平均为 0.264 0 g/kg,MYC 含量最低为 0.202 8 g/kg,前者是后者的 1.30 倍,且不同林地之间差异显著($P<0.05$),但 CK 土壤含磷量要高于 MYC 和 MHW,由此可以看出,除 MHH 和 MHC 外,其他 2 种林型对土壤全磷量并无显著影响。不同造林模式间土壤全钾含量变化与全磷一致,MHH 和 MHC 较造林前增幅最大,0—40 cm 土层平均含量分别为 19.5,15.7 g/kg,是 CK 的 1.39,1.12 倍,不同造林模式全钾含量大小为 MHH(19.50 g/kg)>MHC(15.70 g/kg)>MHW(14.30 g/kg)>CK(14.0 g/kg)>MYC(11.00 g/kg)。这可能是因为 MYC 林地中樱花从土壤中吸收大量养分,但产生较少的根系分泌物及凋落物,不利于土壤中全量养分的恢复。

2.2.3 土壤速效养分含量变化 土壤速效养分只占全量养分的一部分,但却可以直接被植物吸收利用,是植物生长所需营养元素的直接来源。由表 3 可知,在 0—20 cm 土层中,MHC 土壤速效磷含量最高为 1.774 4 mg/kg,其次是 MHH 为 1.079 8 mg/kg,MHW 最低为 0.665 7 mg/kg,各林型间及 CK 间均有显著差异($P<0.05$);20—40 cm 土层各造林模式土壤速效磷含量为 0.615 9~0.876 9 mg/kg,且不同造林模式间两两差异不显著($P>0.05$),由此可以看出速效磷主要在土壤表层聚集,0—20 cm 含量均显著高于 20—40 cm 土层,不同林型之间速效磷含量差

异主要取决于表层含量。速效钾在各林地中均以 MHH 含量最高,上下两层分别为 160.67,108.00 mg/kg,显著高于其他造林模式($P<0.05$),特别是在 0—20 cm 土层内,速效钾含量分别是 MYC、MHC 和 MHW 的 1.74,1.95,2.11 倍。

2.3 不同造林模式林下植被群落物种多样性

2.3.1 林下物种组成及数量特征 林下物种多样性可以更好地评价群落组成、结构及其发展变化,对群落稳定性具有重要意义^[17]。对各林地内物种种类组成调查结果及重要值分析表明,MYC 林下灌木层物种隶属 4 科 6 属 6 种,为美丽胡枝子(*Lespedeza Formosa* (Vog.) Koehne)、山合欢(*Albizia kalkora* (Roxb.) Prain)、野花椒(*Zanthoxylum simulans* Hance.)、芫花(*Daphne genkwa* Sieb. et Zucc.)、木兰(*Magnolia liliflora* Desr)、苦参(*Sophora flavescens*),以美丽胡枝子为优势种,重要值为 0.251 2;林下草本层隶属 6 科 9 属 9 种,以金鸡菊(*Coreopsis drummondii* Torr. et Gray)、稗草(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.)和小薊(*Cirsium setosum* (Willd.) MB.)为优势种,重要值分别为 0.181 7,0.167 6,0.153 9。MHW 林下灌乔丛隶属 4 科 4 属 4 种,为美丽胡枝子、山合欢、桑树(*Morus alba* L.)、槲树(*Quercus dentata* Thunb.),重要值分别为 0.178 3,0.164 5,0.050 3,0.045 8,以美丽胡枝子和山合欢为优势种;草本层隶属 6 科 11 属 11 种,以狭叶珍珠菜(*Lysimachia pentapetala* Bunge)、白酒草(*Conyza japonica* (Thunb.) Less.)、芒(*Miscanthus*

sinensis)和狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)占优势,重要值分别为 0.303 2,0.160 4,0.158 1,0.152 7。MHH 林下灌木丛物种隶属 2 科 3 属 4 种,为胡枝子、美丽胡枝子、山合欢、吉氏木蓝(*Leptodermis kirilowii* Maxim. ex Palib),以胡枝子和山合欢为优势种,重要值为 0.155 8 和 0.102 4;草本层隶属 6 科 10 属 10 种,以稗草、黄背草(*Themeda japonica* (Willd.) Tanaka)、霞草(*Gypsophila oldhamiana* Miq.)占优势,重要值分别为 0.214 3,0.166 5,0.160 6。MHC 林下灌乔层隶属 6 科 6 属 6 种,分别为美丽胡枝子、小叶朴(*Celtis Sinensis* Pers.)、吉氏木蓝、山合欢、雀梅藤(*Sageretia thea* (Osbeck) Johnst.)、野花椒,以美丽胡枝子、小叶朴、吉氏木蓝占优势,分别为 0.178 1,0.133 9,0.129 8;草本层隶属 8 科 9 属 9 种,蹄盖蕨(*Athyrium filix-femina* (L.) Roth)、羊胡子草

(*Eriophorum comosum* Nees)、苦蕒菜(*Ixeris polyccephala* Cass.)为优势种,重要值分别为 0.170 0,0.163 4,0.137 7。CK 林下灌木层物种隶属 2 科 2 属 2 种,分别为胡枝子和吉氏木蓝,以胡枝子为优势种,其重要值为 0.243 3;草本层隶属 10 科 10 属 10 种,以羊胡子草、鸭拓草(*Commelina communis* L.)、小蓬草(*Conyza canadensis* (Linn.) Cronq.)、酢浆草(*Oxalis corniculata* L.)占优势,重要值分别为 0.315 5,0.302 6,0.259 5,0.186 5。由此,人工更新林地和天然更新林地灌木层主要以美丽胡枝子、胡枝子、山合欢等豆科为主优势种,以吉氏木蓝等蝶形花科为辅优势种。人工更新林地草本层主要以金鸡菊、小蓟、白酒草、苦蕒菜等菊科和稗草、芒、狗尾草、黄背草等禾本科占优势,科属相对集中,而自然更新林地草本层优势种科属种类较多,科属分布分散。

表 3 不同造林模式土壤养分含量

指标	林分类型	0—20 cm	20—40 cm	0—40 cm
土壤全磷/(g·kg ⁻¹)	MYC	0.2092±0.0026eA	0.2233±0.0022bB	0.2163±0.0037d
	MHW	0.2485±0.0044cA	0.1925±0.0037dB	0.2207±0.0016cd
	MHH	0.2379±0.0017dB	0.2900±0.0031aA	0.2640±0.0020a
	MHC	0.3158±0.0052aA	0.2020±0.0020cB	0.2589±0.0028b
	CK	0.2616±0.0015bA	0.1863±0.0019eB	0.2240±0.0030c
土壤全钾/(g·kg ⁻¹)	MYC	11.1000±0.41cA	10.9000±0.44dA	11.0000±0.37d
	MHW	15.1000±0.88bA	13.5000±0.75cB	14.3000±0.82c
	MHH	19.3000±1.37aA	19.6000±1.43aA	19.5000±0.13a
	MHC	15.5000±0.68bA	15.9000±0.72bA	15.7000±0.35b
	CK	14.8000±0.57bA	13.1000±0.39cB	14.0000±0.48c
土壤速效磷/(mg·kg ⁻¹)	MYC	0.9312±0.0138cA	0.6747±0.0046bcB	0.8030±0.0092c
	MHW	0.6657±0.0320dB	0.8769±0.0123aA	0.7713±0.0102c
	MHH	1.0798±0.0046bA	0.8006±0.0184abB	0.9402±0.0115b
	MHC	1.7744±0.0275aA	0.6159±0.0332cdB	1.5952±0.0778a
	CK	0.5386±0.0159eA	0.4700±0.0045dB	0.5043±0.0070d
土壤速效钾/(mg·kg ⁻¹)	MYC	92.0000±5.35bA	94.3300±3.86bA	93.1700±3.42b
	MHW	75.6700±2.62cA	49.6700±1.70cB	62.6700±0.47c
	MHH	160.6700±9.03aA	108.0000±6.98aB	134.3300±7.32a
	MHC	82.3300±5.79bcA	46.3300±2.05cB	64.3300±3.92c
	CK	53.0000±2.94dA	42.6700±3.30cB	47.8300±2.62d

2.3.2 不同造林模式下植物多样性指数 物种多样性的恢复是衡量火干扰后森林群落恢复与重建的重要指标之一^[12]。Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数分别反映群落中种类多样性的程度、植物种总数、植物种类所占比例及个体数量在各个种类间分配比例的均匀程度^[18]。MHW、MHH 和 MHC 的 Margalef 指数比较接近,分别为 3.225 1,3.057 6,3.019 2,林下物种丰富,且

与 MYC 及 CK 差异显著($P<0.05$) (表 4)。Shannon-Wiener 和 Simpson 指数中均为 MHH 最高,分别为 1.998 8 和 0.856 1,林下植物多样性水平较高,MHC 次之,分别为 1.898 5 和 0.838 3,2 种林型与 CK 没有显著差异,但 MHH 与 MYC 和 MHW 之间差异显著($P<0.05$),Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在 4 种造林地及 CK 之间变化趋势相同。Pielou 指数中 CK>MYC>MHH>MHC>MHW,CK 林下物种均匀度最高

为0.996 6,且与其他 4 种林型之间差异显著($P<0.05$)。MHH 的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均处于较高水平,林下植被更新状况最好。CK 的多样性指数和均匀度指数较高,这是因为天然更新林地依靠母树下种,更新速度缓慢,无高大植被遮盖,林下光环境较好,利于植被均匀生长^[19]。

表 4 不同造林模式林下植被群落特征

林分类型	Margalef 丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数	Pielou 均匀度指数
MYC	2.5912±0.13b	1.7767±0.09b	0.8155±0.01b	0.9646±0.02b
MHW	3.2251±0.05a	1.8032±0.06b	0.8167±0.01b	0.9267±0.02c
MHH	3.0576±0.10a	1.9988±0.02a	0.8561±0.01a	0.9612±0.01b
MHC	3.0192±0.09a	1.8985±0.11ab	0.8383±0.02ab	0.9534±0.01bc
CK	2.3494±0.07c	1.8822±0.10ab	0.8309±0.03ab	0.9966±0.02a

注:同列不同小写字母表示不同造林模式间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

火烧会改变林地内部小环境,导致土壤物理性质和多种养分含量发生变化。韩雪成等^[20]通过对比未火烧落叶松林和火烧迹地人工落叶松林发现,未火烧林地土壤容重最低,土壤孔隙状况最好,土壤蓄水能力最强。李炳怡等^[21]对火烧迹地油松林研究后发现,中度火烧会造成土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量整体降低。孔健健等^[22]研究发现,火烧会造成土壤磷含量在短期内增加,这种影响随时间增加而变小。本研究表明,对中度迹地进行人工更新较天然更新可以在短时间改善土壤物理性质,提高土壤有机碳氮及养分含量,但不同造林模式下土壤理化性质各有特征,与天然更新林地的差异也各有不同。麻栎—黑松—黄栌林在 4 种造林模式中土壤物理状况达到最佳,在土壤有机碳、碳氮比(C/N)、全磷、全钾、速效钾含量中均为最高,较天然更新林地在土壤容重、通气性、持水性能和土壤养分等方面得到显著提升。这种变化可能与黄栌长势迅速,生长过程中产生较多枯枝落叶,改善土壤物理性质有关^[23]。同时黄栌林下植被覆盖度高,可为植被生态系统提供丰富的有机残体,有利于加快微生物分解和矿化速率,增加土壤养分含量^[24]。麻栎—樱花—刺槐林和麻栎—黑松—五角枫林与天然更新林地相比在土壤物理性质方面有明显改良,但在土壤有机碳、碳氮比(C/N)和全量养分方面并无明显差别,表明刺槐和五角枫发达的根系和较强的吸水能力可改善火烧迹地土壤物理性质,但对土壤化学性质改良效果不明显。

火烧还会直接影响森林生态系统的物种组成,结构稳定性和物种多样性^[25]。本研究表明,人工更新后火烧迹地不同造林模式林下灌草层物种丰富度、多样性和均匀度各有变化特征。麻栎—黑松—黄栌林林下灌草层更新状况与天然更新林相近但是要略优于天然更新,两者林下草本层植物种类相同,但麻

栎—黑松—黄栌林灌木层更新植物种类要多于天然更新林。麻栎—黑松—臭椿林灌草层更新状况与天然更新不相上下,麻栎—黑松—臭椿林丰富度指数略高一些,林下还更新有小叶朴类乔木树种,天然更新林均匀度指数略高。麻栎—樱花—刺槐林在 5 种林地中植被更新状况最差,这与曾思齐等^[9]研究结果一致,他认为与针叶树种混交的林分更新效果更好。麻栎—黑松—黄栌林、麻栎—黑松—臭椿林和天然更新林地较其他 2 种林地土壤偏酸性,这也侧面验证了曾思齐等^[9]认为酸性环境更有利于植被更新。

土壤理化性质的改善和物种多样性的高低是检验植被恢复效果好坏和植物群落是否稳定的有效标志^[26]。麻栎—黑松—黄栌林在改善土壤理化性质,促进林下植被更新方面表现出优异的特性,植被恢复效果良好,林下物种群落稳定,且黄栌具有较高的园林观赏价值,是值得推广和深入研究的模式。麻栎—黑松—臭椿林对火烧迹地修复效果略次于麻栎—黑松—黄栌林,但在促进土壤全氮和速效磷恢复方面表现优异,也是火烧迹地关键的造林模式之一。麻栎—樱花—刺槐林和麻栎—黑松—五角枫林对火烧后土壤物理性质改良效果明显,但在改善土壤养分和物种多样性方面还存在不足,建议小范围内适当推广种植。火烧迹地的恢复是一个漫长的过程,今后还需从多种模式多个方面多种角度全面进行研究,并进行后续跟踪调查研究,以期对不同区域火烧迹地的恢复提供更为科学的参考。

4 结论

(1)与天然更新相比,4 种人工更新模式显著提升了土壤物理性质,土壤容重减小,透气性与持水性增加,能更好地蓄纳降水,减少水土流失;但 4 种人工更新模式对土壤有机碳、碳氮比(C/N)、全磷、全钾、速效钾含量的变化影响各异,以 MHH 对土壤养分的影响最为显著,次之为 MHC 模式,且较天然更

新有较大幅度提高,而 MYC 和 MHW 与天然更新无明显差异。

(2)MHH 和 MHC 的林下植被更新情况与天然更新相近或略优于天然更新,MHH 的 Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数最高,天然更新的 Pielou 均匀度指数最高。

(3)综合分析,MHH 对中度火烧迹地土壤修复效果最佳,植被更新速度最快,林下物种多样性水平最高,是胶东山地丘陵区火烧迹地最适宜的人工更新模式,MHC 次之;MYC 和 MHW 与天然更新在土壤容重等物理性质方面差异显著,但在土壤养分和林下植物更新方面并无明显改善作用。

参考文献:

- [1] 赵志霞,李正才,周君刚,等. 火烧对中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(1):135-140.
- [2] 邹梦玲,辛颖,赵雨森. 大兴安岭火烧迹地植被恢复对碳储量的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):133-137,143.
- [3] Heydari M, Rostamy A, Najafi F, et al. Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests in Iran [J]. Journal of Forest Research, 2017, 28(1): 95-104.
- [4] April L, Robert C, Brett R, et al. Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils [J]. Geoderma, 2017, 286: 125-130.
- [5] 韩杰,应凌霄,李贵祥,等. 云南松混交林火烧迹地更新早期草本层物种多样性的空间格局[J]. 植物生态学报, 2016,40(3):200-211.
- [6] 李红运,辛颖,赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征[J]. 应用生态学报,2016,27(9):2747-2753.
- [7] 王绪高,李秀珍,孔繁花,等. 大兴安岭北坡火烧迹地自然与人工干预下的植被恢复模式初探[J]. 生态学杂志, 2003,22(5):30-34.
- [8] 李媛,程积民,魏琳,等. 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化[J]. 生态学报,2013,33(7): 2131-2138.
- [9] 曾思齐,甘静静,肖化顺,等. 木荷次生林林木更新与土壤特征的相关性[J]. 生态学报,2014,34(15):4242-4250.
- [10] 朱喜,何志斌,杜军,等. 林下植被组成和功能研究进展 [J]. 世界林业研究,2014,27(5):24-30.
- [11] 李锡杰. 威海里口山火烧迹地植被恢复技术研究[D]. 山东 泰安:山东农业大学,2016.
- [12] 王鼎,周梅,赵鹏武,等. 不同更新方式对兴安落叶松林火烧迹地物种组成及多样性的影响[J]. 生态环境学报,2017,26(4):570-575.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2013:3-35,56-58.
- [14] 王月海,许景伟,韩友吉,等. 黄河三角洲 5 个耐盐树种苗木根系形态结构特征[J]. 水土保持研究,2014,21(1):261-266.
- [15] 周志文,潘剑君,居为民,等. 神农架不同坡位 3 种林型土壤碳氮比分布特征[J]. 水土保持学报,2014,28(4): 210-217.
- [16] 杜满义,范少辉,漆良华,等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. 水土保持学报,2010,24(4): 198-202.
- [17] 钟娇娇,陈杰,陈倩,等. 秦岭山地天然次生林群落 MRT 数量分类、CCA 排序及多样性垂直格局[J]. 生态学报, 2018,38(1):1-8.
- [18] 王合云,郭建英,李红丽,等. 短花针茅荒漠草原不同退化程度的植被特征[J]. 中国草地学报,2015,37(3):74-79.
- [19] 黄团冲,贺康宁,王先棒,等. 北川河流域森林冠层结构对林下植被多样性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018,16(4):106-114.
- [20] 韩雪成,赵雨森,辛颖,等. 大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2012, 26(4):183-188.
- [21] 李炳怡,刘冠宏,李伟克,等. 不同火强度对河北平泉油松林土壤有机碳及土壤养分影响[J]. 生态科学,2018, 37(4):35-44.
- [22] 孔健健,张亨宇,荆爽. 大兴安岭火后演替初期森林土壤磷的动态变化特征[J]. 生态学杂志,2017,36(6): 1515-1523.
- [23] 白淑玉,黄桦林地表植物覆盖对土壤质量影响的研究 [D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [24] 邵水仙,董智,李红丽,等. 不同造林模式对退化石灰岩山地土壤理化性质及水文效应的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):263-267.
- [25] 韩风林,布仁仓,常禹,等. 大兴安岭白桦—兴安落叶松林火烧迹地林下植被群落恢复过程的动态分析[J]. 生态学杂志,2015,34(2):312-318.
- [26] 王岩,李玉灵,石娟华,等. 不同植被恢复模式对铁尾矿物种多样性及土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3):112-117,183.