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一樱花一刺槐混交林(MYC)、麻栎一黑松一五角枫 混交林(MHW)、麻栎一黑松一黄栌混交林(MHH)和麻栎一黑松一臭椿混交林(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力.cnki. stbcxb. 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*， *Taian*，*Shandong* 271018)

Abstract: Taking *Quercus a cutissima -Cerasus -Robinia p seudoacacia* mixed forest (MYC), *Quercus a cutissi­ma ~Pinus thunbergH -Acer mono* mixed forest (MHW), *Quercus a cutissima -Pinus t hunbergH -Cotinus c og- gygria* mixed forest (MHH)， and *Quercus acutissima -Pinus thunbergH -AHanthus 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 e**f**ectsofdi**f**erenta**f**orestation modesonsoilremediationandthestatusofsubforestvegetationrenewal were analyzed. The results showed that: (1) MHH had the lowest soil bulk density in 0——40 cm soil layer， thebestsoi aerationperformance， andthebestsoi waterretention.MHC wasthesecondand MYCthe worst. A**l**l of these three were different significantly from CK (*P* < 0. 05) ； (2) The soil organic carbon，ca「 bonnitrogenratio (C/N)， totalphosphorus， total potassium and available potassium contents in MHH werethe highestin0—40cmsoillayer．MHChadthehighesttotalnitrogenandavailablephosphoruscontentsin0—40cm soillayer．Therewasnosignificantdi**f**erenceinsoilorganiccarbon， carbon/nitrogenratio (C/N)，totalphosphorus， total potassium and CK between MYC and MHW (*P* <005)．(3) MHH'sMargalefindex， Shannon-Wienerin- dex， SimpsonindexandPielouindex wererelativelyhigher；(4) Aftercomprehensiveanalysis， itcouldbe concludedthatMHH hadthebestsoilremediatione**f**ecton moderatelyburnedland， andtheregeneration rateofunderstoryvegetationwasthefastest， fo**l**owedby MHC．MYCand MHWcouldimprovesoilphysi- calpropertiesobviously， buthadnoobviouse**f**ectonsoilnutrientsandunderstoryplantregeneration．

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： chenxxl2@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：[hl@sdau.edu](mailto:hl@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B。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也。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\*勺。还 有学者也认为，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 统功能恢复己成为关注的焦点归。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⑺，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⑷，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⑼。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 的有效指标曰，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⑴〕。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⑴〕，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* Car ruth.)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 °C，平均 年降水量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(*C*e*a*s*s*s Sp .)刺槐混交林、黑 *松(Pinns thunbergii* Pari.)五角枫*(Acrr 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 mX20 m的乔木样方，在样方内以“S”形均 匀布设3个面积2 mX2 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， 将同一样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—高氯酸一钼锑抗比 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

酸铵浸提一火焰光度法［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 | 树种 | 树高**/** | 根径**/** | 活枝 | 林下植被 | 土壤 | 造林 |
| 模式 | m | cm | 下高/m | 盖度**/** % | pH | 配比 |
|  | 麻栎 | 660 | 12 18 |  |  |  |  |
| MYC | 樱花 | 209 | 4 29 | 0 35 | 37 | 6 41 | 4：3：3 |
|  | 刺槐 | 219 | 2 11 | 0 30 |  |  |  |
|  | 麻栎 | 602 | 10 36 |  |  |  |  |
| MHW | 黑松 | 202 | 4 42 | 0 35 | 23 | 6 85 | 4：3：3 |
|  | 五角枫 | 207 | 1 94 | 0 21 |  |  |  |
|  | 麻栎 | 673 | 11 53 |  |  |  |  |
| MHH | 黑松 | 196 | 3 56 | 0 35 | 41 | 6 02 | 4：3：3 |
|  | 黄栌 | 238 | 2 13 | 0 20 |  |  |  |
|  | 麻栎 | 648 | 11 55 |  |  |  |  |
| MHC | 黑松 | 184 | 3 18 | 0 33 | 32 | 6 09 | 4：3：3 |
|  | 臭椿 | 229 | 2 12 | 0 42 |  |  |  |
| CK | 麻栎 | 719 | 11 86 |  |  | 6 11 |  |

**1.4**数据处理与分析

重要值（I*V*）以相对密度*（RD）、*相对盖度C*RC*）和 相对高度（*RH*）计算，即*IV=RD+RC+RH0*

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*—l）/lg *N*

Shannon-Wiener 多样性指数=—*SPJn P,*

Simpson多样性指数=1— *EPl*

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,* = *N,/N,P,*为第*i*种的相对重要值, *N* 为第 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 采用Origin &0软件作图，图中数据为平均值士标准 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 l.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/cirf ,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

005）,用字母标记法表示各组数据间的差异显著性,

0—20 cm

不同造林模式

结构,且对表层容重的改良效果优于下层。

0—20 cm 20—40 cm

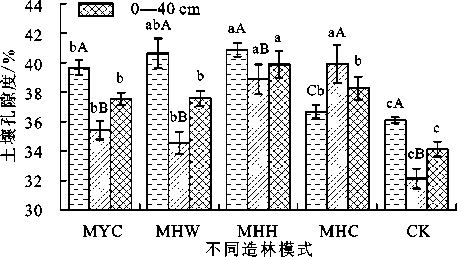
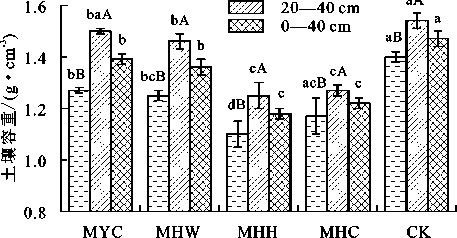


图 **1** 不同造林模式容重和土壤孔隙度

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*V0.05）,表层土壤孔隙度 为40.87%,20—40 cm 土壤孔隙度为3& 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。

21 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*V0.05)。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*〉 005)；各造林模式各层土壤饱和贮水量介于6908〜 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)。

20—40 cm

aA cTi

**CK**

-20-40苗

milbA\_壬三

7656

0—20 cm

20—40 cm

不同造林模式

5050505050

7766554433

UIUV\*圣直\*秤髒出

40

MYC MHW MHH MHC

不同造林模式

0—20 cm 20—40 cm

-0—40 cm aA

不同造林模式

5 0 5 0 5 0

3 3 2 2 1 1 %、\*系如足廻鞍出

0—20 cm 20—40 cm

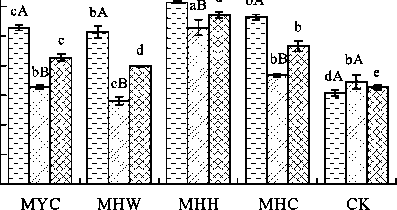
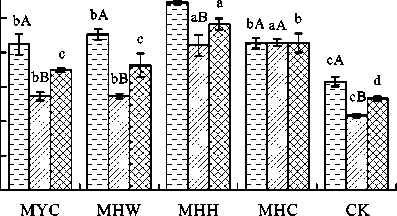
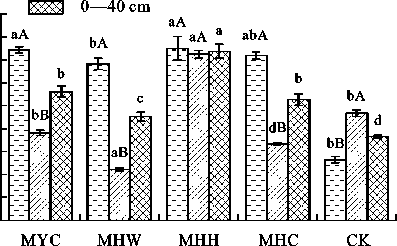
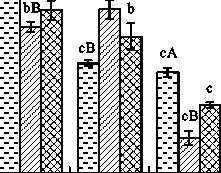
「0—40 cm 人

不同造林模式

5 0 5 0 5 0 5

3 3 2 2 1 1

O



不同造林模式土壤持水状况

图**2**

**22** 不同造林模式对火烧迹地土壤养分的影响 22 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「珂。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*V0.05)。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 & 35〜& 85。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表**2** | | 不同造林模式土壤碳氮含量 | | |
| 指标 | 林分类型 | 0**—**20cm | 20**—**40cm | 0 **—**40cm |
|  | MYC | 5 33士0 26cA | 2. 94±0.19cB | 4 14士0 32bc |
|  | MHW | 4 16士0 27cB | 5 64士0 35bA | 4. 90士0 51b |
| 土壤有机碳/(g **•** kg**—1)** | MHH | 16 33士1 39aA | 13 45士0 74aB | 14. 89士0 76a |
|  | MHC | 14 99士0 64bA | 13. 20士0 50aB | 14 10士0 29a |
|  | CK | 4 16士0 12cA | 2 86士0 27cB | 3 51士0 19c |
|  | MYC | 0 47士0 01cB | 0. 56士0 03dA | 0 51士0 01c |
|  | MHW | 0 46士0 02cB | 0 66士0 01cA | 0 56士0 02c |
| 土壤有机氮/(g **•** kg**-1)** | MHH | 1 09士0 06bA | 1. 06±0 03bA | 1 08士0 05b |
|  | MHC | 1 33士0 01aA | 1. 16±0 02aB | 1 24士0 02a |
|  | CK | 0 41士0 05cA | 0. 39±0 02eA | 0. 40士0 04d |
|  | MYC | 11 45士0 78bA | 5. 25士0 23eB | 8 35士0 43c |
|  | MHW | 9 10士0 29cA | 8 60士0 12cA | 8 85士0 19c |
| 土壤碳氮 比 **(**C**/** N**)** | MHH | 14 97士0 45aA | 12 66士0 28aB | 13 81士0 38a |
|  | MHC | 11 31士0 53bA | 11. 39士0 19bA | 11. 35士0 24b |
|  | CK | 10 27士1 09bA | 7. 26士0 30dB | 8 76士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。

22 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 —40cm 土 层 平 均 为 0 2640g/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夕卜，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(1430g/kg)〉CK(140g/kg)〉MYC(1100g/ 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。

22 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1741 952 11 倍。

**2.3**不同造林模式林下植被群落物种多样性

2 31 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*(Albi zia kalkora* (Roxb. ) Prain)、野花椒*〈Zanthoxylum simulans* Hance.)、芫花*(Daphne genkvua* Sieb. et Zucc .)、木 兰*(Magnoiia liliflora* Desr)、苦参(*Sophora fla- ■vescens)*,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 drummond i i* Torr . et Gray)、稗 草(*Ech inochloa crusgalli* ( L . ) Beauv .)和小蓟*(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 1783，01645，00503，0 0458，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 j aponica* (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 1581， 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*CLn- digofera kiriloxvii* Maxim . ex Palib)，以胡枝子和山 合欢为优势种，重要值为01558和01024；草本层隶属 6科 10 属 10 种，以 稗 草、黄 背 草 (*Themeda japonica*

(Willd. ) Tanaka )、霞草*(Gypsphia oldhamiana* Miq.) 占优势，重要值分别为0 2143，0 1665，0 1606。 MHC 林下灌乔层隶属6科6属6种，分别为美丽胡枝子、小 叶木*朴(CeU Sinensis* Pers.)、吉氏木蓝、山合欢、雀梅藤 *(Sageretia thea* (Osbeck) Johns t )、野花椒，以美丽胡 枝子、小 叶 朴、吉 氏 木 兰 占 优 势，分 别 为 0 1781， 01339，01298；草本层隶属 8科9属 9种，蹄盖蕨 *(Athyrium fl l i x-fem i na (* L . ) Roth)、羊 胡子草 (*Eriophorum comosum* Nees )、苦荬菜 (*Ixeris polycephala* Cass )为 优势种，重要值分别为 01700， 01634，01377。 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02433；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 *CConyza canadensis* (Linn. ) Cronq.)、酢浆草*(Oali corniculata* L )占优势，重要值分别为0 315 5，0 3026， 02595，01865。 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、苦荬菜等菊 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 **—**20cm | 20 **—**40cm | 0 **—**40cm |
|  |  | MYC | 0 2092±0 0026eA | 0 2233±0 0022bB | 02163±0 0037d |
|  |  | MHW | 0 2485±0 0044cA | 0 1925±0 0037dB | 02207±0 0016cd |
| 土壤全磷/(g・ kg | -1) | MHH | 0 2379±0 0017dB | 0 2900±0 0031aA | 02640±0 0020a |
|  |  | MHC | 0 3158±0 0052aA | 0 2020±0 0020cB | 02589±0 0028b |
|  |  | CK | 0 2616±0 0015bA | 0 1863±0 0019eB | 0 2240±0 0030c |
|  |  | 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 |
| 土壤全钾/(g • kg | -1) | 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 |
|  |  | MYC | 0 9312±0 0138cA | 0 6747±0 0046bcB | 08030±0 0092c |
|  |  | MHW | 0 6657±0 0320dB | 0 8769±0 0123aA | 07713±0 0102c |
| 土壤速效磷/(mg • | k**g-1**) | 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 |
|  |  | MYC | 92 0000±5 35bA | 94 3300±3 86bA | 93 1700±3 42b |
|  |  | MHW | 756700±2 62cA | 49 6700±1 70cB | 62 6700±0 47c |
| 土壤速效钾/(mg • | k**g-1**) | 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 |

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18985 和083832 种林型与 CK 没有显著 差异，但MHH与MYC和MHW之间差异显著(*P*< 005) 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 | 25912±013b | 1 7767±0 09b | 0 8155±0 01b | 0 9646±002b |
| MHW | 3 2251±0 05a | 1 8032±0 06b | 0 8167±001b | 09267±0 02c |
| MHH | 3 0576±0 10a | 1 9988±0 02a | 0 8561±0 01a | 09612±0 01b |
| MHC | 3 0192±0 09a | 1 8985±0 11ab | 0 8383±0 02ab | 0 9534±001bc |
| CK | 2 3494±0 07c | 1 8822±0 10ab | 0 8309±0 03ab | 0 9966±002a |

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）.

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[[1]](#footnote-2)。 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，以期为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 能增加，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。

1. 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。
2. 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
2. ：135—140
3. 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.
4. Heydari M, Rostamy A, Najafi F, et al. Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak ( *Que reus brant i i L indl.* ) forests in Iran

**[**J**]** JournalofForestResearch**,** 2017**,** 28**(**1**)：**95—104

1. AprilL**,** RobertC**,** BretR**,** etal Fireefectsoncation exchange capacity of California forest and woodland soils

**[**J**]** Geoderma**,** 2017**,** 286**：**125—130

1. 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
2. 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) ：747-2753.
3. 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
4. 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
5. 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.
6. 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

1. 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

1. 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

1. 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
2. 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

1. 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

1. 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水土保持学报，2010,24(4)：

198-202

1. 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
2. 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.

1. 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[].中国水土保持科学，

2018 16(4)：106-114

1. 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
2. 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,018, 37(4)：35-44
3. 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

1. 白淑玉 黄栌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
2. 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
3. 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
4. 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

1. 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32251，30576，30192，林下物种丰富，且 [↑](#footnote-ref-2)