|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 学校代码：10225 | | | |
| 东北林业大学横版组合 | | | |
| **本 科 毕 业 论 文** | | | |
| 不同强度火烧对油松林下土壤金属元素的影响分析 | | | |
| 教明明 | | | |
|  | 学 院： | 林学院 |  |
|  | 专业班级： | 环境科学2019-1 |  |
|  | 指导教师： | 舒展 讲师 |  |
|  | 学 号： | 2019212630 |  |

2023年6月

摘要

本研究以河北省平泉县天然油松林为研究对象，将火烧样地划分为轻度、中度及重度火烧3种火烧迹地，同时对0-10cm、10-20cm、20-30cm土层深度土壤进行取样研究，用于测定土壤样本pH值及铜、锌、锰、钾营养元素含量，借以分析不同火烧强度和不同土壤深度对火烧干扰后土壤pH值、铜、锌、锰、钾元素含量影响及变化。研究结果表明：（1）不同火烧强度对土壤pH值差异影响显著（P＜0.05），重度火烧干扰后pH值有显著上升；（2）不同火烧强度对铜元素含量差异影响显著，与未受火烧干扰组进行比较分析，铜元素含量在轻度、中度火烧强度下有显著增大，且随着火烧强度增大，与对照组相比铜元素含量在0-10cm表层土层中显著增加，在20-30cm深土层中显著减少。（3）不同火烧强度对锌元素含量影响显著，与未受火烧干扰组进行比较分析，锌元素含量在重度火烧强度下有显著减少。且随着火烧强度增大，锌元素含量在0-10cm、 10-20cm、20-30cm土层中均增加后减少。（4）不同火烧强度对锰元素含量差异影响显著，与未受火烧干扰组进行比较分析，锰元素含量在轻度火烧强度下有显著增大。（5）不同火烧强度对钾元素含量差异影响显著，与未受火烧干扰组进行比较分析，随着土层深度变大，钾元素含量在轻度、中度火烧强度下有显著的先减少后增多的变化趋势。在10-20cm、20-30cm土层深度中，重度火烧情况下的钾元素含量有显著增大。（6）相关性分析结果显示，土壤酸碱性与铜、锌、锰、钾四种元素含量之间存在显著的相关性关系，同时铜、锌、锰、钾四种元素含量之间也存在显著相关性。数据显示，林火干扰对土壤pH值、铜、锌、锰、钾含量有显著影响，且影响程度与火烧强度、土壤深度密切相关，并具有不同的变化特点，这也为当地火烧迹地恢复和重建提供了基础数据支持。

**关键词**：林火；火烧强度；油松；营养元素；

Abstract

This study takes the natural *Pinus tabulaeformis* forest in Pingquan County, Hebei Province as the research object. The fire sample plots were divided into three types of fire residues: mild, moderate, and severe. At the same time, soil samples were taken at depths of 0-10cm, 10-20cm, and 20-30cm to determine the pH value of soil samples and the content of Cu, Zn, Mn, and K nutrients. This study aims to analyze the effects of different fire intensities and soil depths on the soil pH value, copper, zinc, and manganese after fire disturbance The impact and changes of potassium content. The research results indicate that: (1) different fire intensities have a significant impact on the difference in soil pH value (P<0.05), and the pH value significantly increases after severe fire interference; (2) Different fire intensities have a significant impact on the difference in Cu element content. Compared with the group not affected by fire interference, the Cu element content significantly increases under mild and moderate fire intensities. As the fire intensity increases, the Cu element content significantly increases in the 0-10cm surface soil layer compared to the control group, and decreases significantly in the 20-30cm deep soil layer. (3) Different fire intensities have a significant impact on the content of Zn elements. Compared with the group not affected by fire interference, the content of Zn elements is significantly reduced under severe fire intensities. And as the burning intensity increases, the content of Zn element increases and then decreases in soil layers of 0-10cm, 10-20cm, and 20-30cm. (4) Different fire intensities have a significant impact on the difference in Mn element content. Compared with the group not affected by fire interference, the Mn element content significantly increases under mild fire intensities. (5) Different fire intensities have a significant impact on the difference in K element content. Compared with the group not affected by fire interference, as the soil depth increases, the K element content shows a significant trend of decreasing first and then increasing under mild and moderate fire intensities. In soil depths of 10-20cm and 20-30cm, the K element content significantly increases under severe fire conditions. (6) The correlation analysis results show that there is a significant correlation between soil acidity and the content of copper, zinc, manganese, and potassium, and there is also a significant correlation between the content of copper, zinc, manganese, and potassium. The data shows that forest fire interference has a significant impact on soil pH, copper, zinc, manganese, and potassium content, and the degree of impact is closely related to fire intensity and soil depth, with different variation characteristics. This also provides basic data support for the restoration and reconstruction of local fire burned areas;

**Keywords**：Forest fire; Fire intensity; *Pinus tabulaeformis*; Nutrient elements;

目录

[摘要 I](#_Toc137479785)

[Abstract II](#_Toc137479786)

[目录 III](#_Toc137479787)

[1 绪论 1](#_Toc137479788)

[1.1 研究目的和意义 1](#_Toc137479789)

[1.2 研究现状 2](#_Toc137479790)

[1.3 研究区域概况 3](#_Toc137479791)

[2 材料与方法 4](#_Toc137479792)

[2.1 火烧程度等级划分 4](#_Toc137479793)

[2.2 样地设置及样品采集 4](#_Toc137479794)

[2.3土壤pH与营养元素的测定 5](#_Toc137479795)

[2.4数据分析 5](#_Toc137479796)

[3结果与分析 7](#_Toc137479797)

[3.1不同火烧强度下Cu、Zn、Mn及K元素含量分析 7](#_Toc137479798)

[3.2不同火烧强度下不同土壤深度pH值 9](#_Toc137479799)

[3.3不同土壤深度Cu、Zn、Mn及K元素含量分析 10](#_Toc137479800)

[3.4土壤pH值及四种营养元素的双因素方差分析 12](#_Toc137479801)

[3.5土壤pH值及四种元素的相关性分析 13](#_Toc137479802)

[4讨论 15](#_Toc137479803)

[4.1不同火烧强度对Cu、Zn、Mn元素含量的影响 15](#_Toc137479804)

[4.2不同火烧强度对K元素含量的影响 16](#_Toc137479805)

[4.3不同火烧强度对土壤pH值的影响 16](#_Toc137479806)

[结论 18](#_Toc137479807)

[参考文献 19](#_Toc137479808)

[致谢 21](#_Toc137479809)

# 绪论

## 研究目的和意义

森林火灾是一种常见的自然现象，同时也是森林生态系统最为重要的影响因子，对森林生态系统的演替、发展具有举足轻重的作用[1]。森林火灾不仅会使林木大量烧毁，土壤孔隙度降低，土壤含水率下降，而且会导致森林生态环境发生变化，比如森林火烧时产生的高温会破坏地表草本、灌木植被，同时也会改变土壤的理化性质[2]。土壤理化性质是衡量森林土壤肥力的重要标准，土壤理化性质发生变化，直接或间接导致土壤腐殖质、营养元素发生显著变化，所以土壤理化性质的改变也是评估森林火灾损失的重要依据[3]。土壤pH值与土壤理化性质、表层植被的生长发育、土层微生物的生命活动联系紧密，是影响森林火灾后森林土壤变化的重要因素[4]，与此相关的土壤养分也是林木生长发育所需要的物质基础，直接关系到土壤肥力大小，例如土壤中的Cu、Zn、Mn、K等营养元素是植物生长所必须的营养物质[6]。Cu元素在植被光合作用、木质化过程中有重要作用，还参与碳素同化、氮素代谢等过程；Zn对植物化合物的合成、转运起着重要作用，还能促进植物体内蛋白质的合成，且可以抑制植物对有毒元素镉的吸收；Mn元素参与构建绿色植物的细胞器叶绿体，与林下植被的光合、呼吸及硝化作用有着密切联系，同时Mn元素促进氨的形成，还能调节氧化还原过程，保持对铁元素吸收的比例平衡。这些土壤微量元素也是易于被控制和调节的因子，对土壤其他部分产生直接和间接的作用[7-8]；K是土壤中含量最高的营养元素，缺钾植株根系发育不良，常常腐烂，抗旱、抗病等抗逆能力下降等[9-10]。所以Cn、Zn、Mn、K与动植物及土壤微生物关系最为密切，甚至会影响土壤肥力及火烧后的森林次生演替进程，所以对火烧迹地土壤中金属营养元素的监测至关重要。

森林火灾会影响土壤的理化性质、微生物的生命活动、地表植被生长发育和土壤矿物的转化，影响程度主要来源于火烧强度、火烧频率等多方面的因素[11-12]。本研究选在河北省平泉县天然火烧林，近些年来由于气候变化及人为原因，该地火灾次数不断增多，森林火灾也成为了我国北方油松林破坏的重要干扰因子，因此对火灾干扰后火烧迹地的研究刻不容缓。在林火干扰下，土壤物理化学性质均会发生显著变化，但是土壤中微量元素含量在受到不同程度火烧后发生怎样的改变，与相关元素的相关性关系，这方面的研究还相对匮乏。近几十年来，大部分国内外学者对森林火灾的研究主要集中在森林火灾对土壤理化性质的影响、不同火烧强度干扰对土壤表层植被的影响、森林火灾对土壤微生物活性的影响、不同火烧强度干扰后植被的恢复及火烧迹地的重建。林火对土壤微量元素的影响因素主要是元素的化学性质、土壤的理化性质、火烧强度及气候条件，因此会对土壤微量元素形成不同的含量差异。

综上所述，研究不同强度火烧干扰下土壤微量元素的含量变化，对评价森林火灾干扰后的土壤肥力、表层植被恢复、微生物群落与火烧迹地的重建具有重要的作用。但是受多种气候条件的影响以及研究技术发展阻滞，目前对火烧干扰后的微量元素含量及其相互作用关系的研究比较少，这有待人们继续研究和探索。

## 研究现状

上世纪80年代以后，我国森林火灾每年25万余次，每年平均破坏森林或其他林地面积大约636.7万hm2，燃烧面积占全球森林总面积0.2-0.3%[13]。近年来由于我国受到极端气候变化以及人工干扰的影响，森林大火不断发生，2019年3月，我国四川凉山州发生巨大森林火灾，导致30余名救火队员牺牲。次年凉山州再次发生森林火灾，这起森林火灾造成各类土地过火总面积3000多公顷，严重受害森林面积800余公顷，经济损失近一亿元。全球范围内，在北美洲、南美洲、地中海沿岸、俄罗斯以及澳大利亚均发生森林火灾，总过火面积超过20万km2，致上百名平民及多名消防员牺牲。我国受地理位置和气候条件的综合影响，导致我国的森林火灾具有复杂的特点。据统计，上世纪后半叶，我国年均森林火灾发生率约为1.43万次，年均林地受害面积约82.2万hm2。尤其在我国北方地区，森林火灾出现次数及燃烧面积则更为严重，殷丽等根据卫星遥感数据，对大兴安岭林区森林火灾进行了研究，结果显示：2005-2007三年期间，林区总过火面积为400多万hm2，其中轻度火烧面积为200余万hm²、中度火烧面积为150余万hm2和重度火烧面积为80余万hm2[14]。

近几十年国内外相关研究表明土壤中的金属元素含量在不同强度火烧过程中会出现变化，相关研究以钾、碳、磷等大量元素研究最多，而针对铜、锌、锰等微量元素报道较少[15]。我国从上个世纪70年代开始对我国土壤中的元素营养问题进行研究，可是这些研究都是在农业生产领域，集中在研究土壤元素对农产品产量的方向上，少数研究是针对森林生态系统中土壤中的微量元素效用及不同干扰对微量元素效应的影响，其中土壤元素研究包括土壤腐殖质、土壤微生物群落、土壤酸碱性、土壤孔隙度、土壤植物、还有众多营养元素之间的影响。可是，有关不同火烧强度对土壤Cu、Zn、Mn、K等元素含量的影响却鲜有报道[16-17]。李炳怡研究华北平原林火对土壤微量元素的影响时发现，不同火烧强度对K元素含量有显著影响，随着火烧强度增加，K元素含量显著增大，但是随着火烧迹地恢复年限增加，K元素含量随之降低[18]。岳鑫等对山东省威海里口山林火迹地为研究对象，结果表明：与对照组相比，受到不同强度火烧干扰后的土壤pH值显著升高，其中重度火烧土壤pH值最高，轻度火烧土壤pH次之，中度火烧土壤pH最低；受到不同程度火烧干扰后土壤钾元素含量显著降低，其中重度火烧干扰的土壤中K元素含量下降最多，轻度火烧干扰的土壤中K元素含量次之，中度火烧干扰的土壤中K元素含量下降最少[2]。

国外有部分报道提及火烧强度对土壤微量元素的影响：Monleon与Moore研究火烧干扰时发现在轻度火烧之后K和Ca元素含量会有所增加，而重度火烧之后K和Ca元素含量会大量降低[19-20]；有学者着重研究过森林计划中度火烧情况下K、Mg、Ca元素含量变化，研究表明中度火烧情况下K和Mg元素含量有少量增多，而Ca元素损失相比对照组较为显著[21]；Robert R在研究亚热带地区森林火烧后土壤营养元素变化情况时发现表层土壤中Ca元素含量增加了近一倍、Mg、K元素元素含量增加较少，一般在10%上下浮动；而对火烧干扰常绿阔叶混交林灌丛土壤的影响时发现，在经过不同强度火烧干扰后，土壤表层中的Mg元素含量随火烧程度增大而增大；轻度火烧后，土壤表层植被被烧毁，产生大量的灰分，主要包括Ca、Mg、Na以及相关的硫化物、氯化物等，使得土壤肥力增大，同时研究发现在计划火烧起始会造成K、Ca、Mg元素的大量减少，具体原因有待进一步研究[22]。

结合国内外研究结果，火烧干扰对Cu、Zn、Mn、K等元素的影响是一个复杂的过程，火烧程度与林型、降雨以及大风等因素有关，这些自然因素都会造成火烧迹地土壤中营养元素的变化。近年来虽然国内外对于森林火灾后森林群落结构变化、土壤理化性质变化等研究较多，但是对于不同程度火烧干扰、不同土壤深度的Cu、Zn、Mn、K四种营养元素的含量变化的研究不足，本研究正是在基于这样的国内外研究背景下进行的。

## 研究区域概况

本研究调查区域位于河北省平泉县，地理坐标为118°21′03″~119°15′34″E，40°24′0″~40°40′17″N，为河北、辽宁、内蒙古三省交界地带，全境皆山，是个“七山一水二分田”的山区市。

河北平泉县为季风型气候，由于山区较多，形成地貌复杂的小气候区。由此形成的气候特点是：冬季寒冷期长，日照时间长，雨量充沛，昼夜温差大，所以形成的气候灾害较多。春季风大干旱，降雨量在61-84mm之间，风速约为3-5m/s，风沙天气较多；夏季高温多雨，雨量较为集中，降雨量占全年一半以上，降雨量在320-480mm之间，7月气温最高，平均22~32℃但高温持续时间短，昼夜温差大，夏季并不酷热；秋季，雨量骤减，气温速降，气候干燥，全季风速约2m/s；冬季寒冷干燥，无霜期最高达140天，降雨量在13-23mm之间。土壤类型主要为棕壤土、褐土及草甸土，以棕壤土分布最广，占全境面积68.8%；研究区域森林类型为天然次生林，根据政府公开数据表示，当地森林覆盖率达60%以上，主要树种为油松（*Pinus tabulaeformis*）、刺槐(*Robinia pseudoacacia*) [23]，灌木主要有胡枝子（*Lespedeza bicolor*）、锦带花（*Weigela florida*）、土庄绣线菊（*Spiraea pubescens*）、山杏（*Armeniaca sibirica*）等。

油松广泛分布于我国湿润半湿润地区，是东北地区及华北地区森林的主要林分之一[24]。本次火烧迹地研究区域位于河北省平泉境内，是当地及华北地区的主要天然油松保护林区。近年研究区发生多起森林火灾，过火面积达800余亩。在样本采集之前对样地进行了实地勘测，根据不同样地火烧程度对样地进行等级划分，从而选取适合的样地，对火烧后土壤营养元素含量进行响应研究。样地选取结果显示：研究区域内存在轻度火烧、中度火烧和重度火烧类型火烧迹地。

# 材料与方法

## 火烧程度等级划分

火烧强度是指在林火火锋处，单位长度、单位时间林木燃烧所释放的总能量[25]。林火强度是影响森林火灾的重要因素之一，不同强度火烧也会对森林植被、微生物及土壤理化性质产生不同效应，因此研究不同强度火烧的影响差异对森林整体研究及火烧恢复意义重大。本研究根据研究区域内火烧迹地中烧死林木比率、烧死灌木及草本比率、凋落物烧毁率、腐殖质层烧毁率以及油松熏黑高度，将火烧强度分为轻度、中度及重度火烧三个等级。具体火烧程度等级划分见表2-1。

表2-1火烧程度等级划分

|  |  |
| --- | --- |
| 火烧程度 | 划分标准 |
| 未过火 | 没有经过火烧的林分 |
| 轻度火烧林分 | 乔木熏黑高度在≤2m，火灾烧死木≤30%，林下灌木、草本一半以下被烧毁（≤50%)，调落物一半以下被烧毁（≤50%)，腐殖质层一半以下被烧毁（≤50%) |
| 中度火烧林分 | 乔木熏黑高度在 2-5m，火灾烧死木占30%-70%，林下灌木、草本大部分被烧毁（>50%），凋落物大部分被烧毁（＞50%），腐殖质层大部分被烧毁（>50%） |
| 重度火烧林分 | 乔木熏黑高度 5m以上，火灾烧死木70%以上（≥70%），林下灌木层、草本层、调落物层和腐殖质层几乎全部烧掉 |

## 样地设置及样品采集

研究区域内发生火灾的森林类型为天然次生油松林，为尽量消除地形因素对取样地点造成的影响，本次样地选择地理环境相同或相似，海拔高度、地势相同或相似，森林林下环境相同或相似的原则选择采样地点。结合研究内容，在待测油松林按照不同火烧强度等级选取样地，同时选择海拔、纬度、坡度相同且具有代表性的火烧迹地设置对照组，大小均为30m×30m，每块样地三个重复，且重复样地之间海拔、纬度、坡度相同，且立地条件相似，共设置30m×30m的火烧样地12块，再根据土层深度分别取样，共计36个土壤样本。

在每块样地内采用五点取样法采集土壤样品，具体操作为：在待测样地内随机选取5个采样点，在每处采样点先除去肉眼可见的石块、草根、凋落物、动植物残体，用土壤取样器采集土壤样本。众多研究表明，火烧强度一般对深层土壤影响较小，故本次研究只在0-10cm、10-20cm及20-30cm3个土层深度钻取土壤剖面，每个断面取样点取新鲜土壤样本1kg，将5个采样点各断面土壤混合均匀，除去肉眼可见的杂质及动植物残体，使用四分法获得土壤样本大约1kg，完全风干后装入干净布袋，标好标准地号，用保鲜箱将土壤样本带入实验室后除杂，使用电热鼓风干燥机以60℃烘干7h，烘干后使用研钵磨碎，过0.25mm筛供土壤营养元素及土壤pH值分析。

表2-2土壤样本坐标（取样时间2022年11月）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 组别 | 样地编号 | 北纬 | 东经 | 海拔  /m | 土样编号 | | |
| 0-10cm | 10-20cm | 20-30cm |
| 重度火烧 | 1 | 41°19′53.46″ | 118°28′57.34″ | 1119 | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 41°19′54.48″ | 118°28′57.06″ | 1128 | 1A | 2A | 3A |
| 3 | 41°19′56.32″ | 118°28′56.60″ | 1140 | 1B | 2B | 3B |
|  | 4 | 41°19′54.57″ | 118°28′55.92″ | 1129 | 4 | 5 | 6 |
| 中度火烧 | 5 | 41°19′55.97″ | 118°28′55.81″ | 1140 | 4A | 5A | 6A |
| 6 | 41°19′56.93″ | 118°28′55.68″ | 1147 | 4B | 5B | 6B |
|  | 7 | 41°19′59.87″ | 118°28′41.06″ | 1147 | 7 | 8 | 9 |
| 轻度火烧 | 8 | 41°19′59.73″ | 118°28′42.52″ | 1134 | 7A | 8A | 9A |
| 9 | 41°19′57.44″ | 118°28′44.43″ | 1121 | 7B | 8B | 9B |
| 对照组 | 10 | 41°19′54.44″ | 118°28′26.52″ | 1124 | 10 | 11 | 12 |
| 11 | 41°19′55.65″ | 118°28′24.64″ | 1143 | 10A | 11A | 12A |
| 12 | 41°19′58.24″ | 118°28′22.89″ | 1157 | 10b | 11b | 12b |

## 2.3土壤pH与营养元素的测定

pH值测定：土壤pH值测定采用实验室较为常用的玻璃-甘汞电极电极电位测定法，同一份土壤样品测定3次，后取平均值记录。

Cu、Zn、Mn元素含量测定：Cu、Zn、Mn元素含量使用原子吸收分光光度计进行测定，在准备好待测液和标准液系列后，分别在波长324.7nm，213.9nm，279.5nm测定待测溶液和标准工作溶液系列中的Cu、Zn、Mn浓度，之后将标准溶液浓度输入仪器，直接读出浓度值。

K元素含量测定：K元素含量测定采用醋酸氨-火焰光度计法，此方法只用于测定土壤中的速效钾含量。

## 2.4数据分析

数据分析使用SPSS2022单因素方差分析(ANOVA)检验不同强度火烧对pH值以及Cu、Zn、Mn、K四种土壤元素含量变化的影响，实验数据采用“平均值±标准误差”记录并处理。研究数据在正态分布及方差齐性前提下使用单因素方差（One-Way ANOVA）分析Cu、Zn、Mn及K土壤四种元素含量在不同火烧强度、不用土壤深度的显著性差异，使用双因素方差分析火烧强度和土层深度对土壤pH值和Cu、Zn、Mn、K四种营养元素含量及数值的主效应和交互作用影响，采用相关性分析进行pH值与Cu、Zn、Mn、K土壤四种元素含量之间以及四种营养元素之间的相关性检验。分析软件使用SPSS26.0，数据分析均在显著性程度0.05水平下检验，数据图表绘制均使用Origin2021。

# 3结果与分析

## 3.1不同火烧强度下Cu、Zn、Mn及K元素含量分析

由图3-1及表3-1可知，在0-10cm表层土壤中，不同强度火烧干扰后各元素含量变化显著。轻度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为9.49±0.37μg/g、51.39±0.63μg/g、166.38±1.86μg/g、55.5±0.79μg/g。相比对照组Cu、Zn、Mn元素含量显著增大，分别增加7.48%、6.4%、9.0%，K元素含量显著降低7.7%。在中度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为9.16±0.22μg/g、57.85±0.44μg/g、192.24±5.13μg/g、70.2±1.71μg/g。相比对照组Zn、Mn、K元素含量显著增大，分别增加18.58%、25.9%、16.79%，Cu元素含量变化不显著。在重度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为11.0±0.29μg/g、45.36±0.75μg/g、166.31±5.52μg/g、45.38±1.54μg/g 。相比对照组Cu、Mn元素含量显著增加，分别增加24.58%、8.9%，Zn、K元素含量显著减少，分别为6.07%、21.53%。

由图3-2及表3-1可知，在10-20cm土层土壤中，不同强度火烧干扰后各元素含量变化显著。轻度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为9.27±0.19μg/g、47.49±0.3μg/g、154.1±3.31μg/g、47.58±1.21μg/g。相比对照组Cu、Zn、Mn元素含量显著增加，分别增加22.78%、9.52%、21.81%，且仅有K元素含量降低，且变化不显著。在中度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为10.6±0.32μg/g、61.57±0.71μg/g、111.43±3.07μg/g、58.54±3.3μg/g。相比对照组Cu、Zn、K元素含量显著增大，分别增加22.78%、10.22%、14.34%，Mn元素含量显著减少11.91%。在重度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为6.47±0.33μg/g、31.01±0.66μg/g、102.14±2.49μg/g、50.42±2.06μg/g。相比对照组Cu、Zn、Mn元素含量均显著减少，分别为14.30%、28.48%、19.26%，且K元素含量变化不显著。

由图3-3及表3-1可知，在20-30cm土层土壤中，不同强度火烧干扰后各元素含量变化显著。在轻度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为7.36±0.22μg/g、40.8±0.18μg/g、132.14±1.41μg/g、51.18±0.85μg/g。相比对照组Cu、Mn、K元素含量显著增加，分别为18.71%、14.76%、12.53%，Zn元素含量基本无变化。在中度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为3.65±0.10μg/g、43.98±0.40μg/g、104.0±1.23μg/g、67.07±1.05μg/g。相比对照组Zn、K元素含量显著增大，分别为7.37%、47.47%，Cu、Mn元素含量显著减少，分别为41.13%、7.67%。重度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素含量分别为4.65±0.25μg/g、38.63±0.35μg/g、98.78±0.49μg/g、61.13±0.67μg/g。相比对照组Cu、Zn、Mn含量均显著减少，分别为25%、5.7%、12.30%，K元素含量显著增大34.39%。



图3-1 0-10cm土层深度下不同火烧强度营养元素含量



图3-2 10-20cm土层深度下不同火烧强度营养元素含量



图3-3 20-30cm土层深度下不同火烧强度营养元素含量

表3-1 不同火烧强度对不同土层深度土壤营养元素的影响分析

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土层深度 | 火烧强度 | Cu(μg/g) | Zn(μg/g) | Mn(μg/g) | K(μg/g) |
| 0-10cm | 对照组 | 8.83±0.26aC | 48.29±0.68aC | 152.7±3.16aC | 60.11±1.92aB |
| 轻度火烧 | 9.49±0.37aB | 51.39±0.63aB | 166.38±1.86aB | 55.5±0.79aC |
| 中度火烧 | 9.16±0.22bC | 57.85±0.44bA | 192.24±5.13aA | 70.20±1.71aA |
| 重度火烧 | 11.0±0.29aA | 45.36±0.75aD | 166.31±5.52aB | 45.38±1.54cD |
| 10-20cm | 对照组 | 7.55±0.18bC | 43.36±0.57bC | 126.50±2.34bB | 51.46±1.18bB |
| 轻度火烧 | 9.27±0.19aB | 47.49±0.30bB | 154.1±3.31bA | 47.58±1.21bB |
| 中度火烧 | 10.6±0.32aA | 61.57±0.71aA | 111.43±3.07bC | 58.54±3.30bA |
| 重度火烧 | 6.47±0.33bD | 31.01±0.66cD | 102.14±2.49bD | 50.42±2.06bB |
| 20-30cm | 对照组 | 6.2±0.15cB | 40.96±0.35cB | 112.63±2.09cB | 45.48±0.36cD |
| 轻度火烧 | 7.36±0.22bA | 40.80±0.18cB | 132.14±1.41cA | 51.18±0.85cC |
| 中度火烧 | 3.65±0.10cC | 43.98±0.40cA | 104.0±1.23bC | 67.07±1.05aA |
| 重度火烧 | 4.65±0.25cD | 38.63±0.35bC | 98.78±0.49bD | 61.13±0.67aB |

注:数据记录为平均值±标准差。不同小写字母表示不同土层之间元素含量差异显著(P<0.05)，不同大写字母表示不同样地之间元素含量差异显著(P<0.05)，下同。

## 3.2不同火烧强度下不同土壤深度pH值

将土壤pH值按照轻度、中度、重度火烧强度及0-10cm、10-20cm、20-30cm土壤深度分别进行方差分析，分析结果如表3-2：

由表3-2可知，轻度火烧、中度火烧情况下土壤pH值较为接近，在0-10cm土层深度、轻度火烧情况下土壤pH值明显增大，达到了6.52±0.06，在20-30cm土层深度、中度火烧情况下土壤pH值较大，为6.33±0.08，在重度火烧情况下，0-10cm、10-20cm、20-30cm土层深度情况下，土壤pH值均有显著增大，分别为6.43±0.07、6.71±0.09、6.61±0.12。根据相关性及差异性分析结果可知，不同火烧强度与土壤pH值之间相关性极显著(P<0.01)，差异性也极显著(P<0.01)，由此说明不同火烧强度对土壤pH值有显著相关影响。不同土层深度间土壤pH值差异性不显著。不同强度火烧干扰对土壤pH具有显著影响，其中对照组土壤平均pH为6.01，火烧干扰后平均pH为6.32，其中轻度火烧干扰后土壤pH为6.22，中度火烧干扰后为6.16，重度火烧干扰后pH涨幅最大，平均为6.59。

表3-2 不同火烧强度对不同土层深度土壤pH值影响

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 土壤深度 | 对照组 | 轻度火烧 | 中度火烧 | 重度火烧 |
| 0-10cm | 5.83±0.06bC | 6.52±0.06aA | 6.03±0.09bB | 6.43±0.07bA |
| 10-20cm | 6.11±0.08aB | 6.08±0.06bB | 6.03±0.1bB | 6.71±0.09aA |
| 20-30cm | 6.08±0.08aB | 6.07±0.17bB | 6.33±0.08aA | 6.61±0.12aA |

## 3.3不同土壤深度Cu、Zn、Mn及K元素含量分析

由图3-5可知，轻度火烧情况下，Cu、Zn、Mn、K四种元素在0-10cm、10-20cm、20-30cm土层深度之间变化显著。具体表现为：轻度火烧情况下，Cu元素含量在3个不同土层深度土壤中显著增加，其中在10-20cm土层增加最为显著，增加了40.40%；Zn元素含量在表层土层中显著增加6.5%，而Zn元素含量却在20-30cm土层深度变化不显著；Mn元素含量在3个不同土层深度土壤中显著增加，其中在10-20cm土层增加最为显著，增加了21.82%；K元素含量在0-10cm、10-20cm层土壤显著减少7.7%、7.6%，在20-30cm土层中显著增加13.42%。

由图3-6可知，中度火烧轻度下，Cu、Zn、Mn、K四种元素在0-10cm、10-20cm、20-30cm土层深度之间变化显著。具体表现为：Cu元素含量在表层土层中含量变化不显著，在10-20cm土层中增加了15.72%，增加较为显著，在深度土层中显著减少了41.13%，降幅较为显著；Zn元素含量在3个不同土层深度土壤中显著增加，其中在10-20cm土层中显著增加42%，增加最为显著；Mn元素含量在表层土层中显著增加25.9%，在10-20cm、20-30cm土层土壤中分别显著减少了11.92%、7.7%；K元素含量在3个不同土层深度土壤中均显著增加，其中在深层土层中增加最为显著，增加了47.47%。

由图3-7可知，重度火烧轻度下，Cu、Zn、Mn、K四种元素在0-10cm、10-20cm、20-30cm土层深度之间变化显著。具体表现为：Cu元素含量在表层土层中显著增加24.58%，在10-20cm、20-30cm土层中显著减少了14.31%、25%；Zn元素含量在3个不同土层深度土壤中均显著减少，其中在10-20cm土层深度中减少最为显著，减少了28.49%；Mn元素含量在表层土层深度中显著增加了8.9%，在10-20cm、20-30cm土层土壤中显著减少19.26%、12.3%；K元素含量在表层土层深度显著减少24.51%，其中在深层土层深度中显著增加34.41%。

****

图3-4 未过火条件下不同土壤深度土壤元素变化情况



图3-5 轻度火烧条件下不同土壤深度土壤元素变化情况



图3-6 中度火烧条件下不同土壤深度土壤元素变化情况



图3-7 重度火烧条件下不同土壤深度土壤元素变化情况

## 3.4土壤pH值及四种营养元素的双因素方差分析

考虑到土壤pH值和Cu、Zn、Mn、K四种营养元素数值及含量变化同时受火烧强度及土层深度影响，为分析其主效应和交互作用的影响，对其进行双因素方差分析，土壤pH值和Cu、Zn、Mn、K四种营养元素双因素方差分析如表3-3所示：

双因素方差分析表明：火烧强度对土壤pH值和Cu、Zn、Mn、K四种营养元素数值及含量变化主效应影响极显著（P＜0.01），土层深度对土壤pH值和Cu、Zn、Mn、K四种营养元素数值及含量变化主效应影响极显著（P＜0.01），火烧强度和土层深度的交互作用对土壤Cu、Zn、Mn、K四种营养元素数值及含量变化主效应影响极显著（P＜0.01），对土壤pH值的交互作用影响不显著（P＞0.05）。

表3-3 土壤酸碱性与土壤营养元素间双因素方差分析

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 指标 | Sig. | | |
| 火烧强度Ⅰ | 土层深度Ⅱ | Ⅰ×Ⅱ |
| pH | ＜0.01 | ＜0.01 | 0.308 |
| Cu | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 |
| Zn | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 |
| Mn | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 |
| K | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 |

## 3.5土壤pH值及四种元素的相关性分析

采用双因素方差分析火烧强度和土层深度对土壤酸碱性和Cu、Zn、Mn、K四种营养元素的数值及含量变化，在土壤学研究中，土壤酸碱性发生变化，不仅会导致表层植被和土层微生物群落生长发育受阻、酶活性降低，而且会导致各营养元素成分之间原本的联系发生改变。由此可见，Cu、Zn、Mn、K四种元素在受到不同火烧强度和不同土层深度影响后，其基础含量之间也存在显著差异。为进一步分析印证土壤养分和土壤酸碱性之间存在一定的显著性关系，采用相关性分析来研究土壤中各微量营养元素及土壤酸碱性间的关系。表3-4展示了土壤养分和土壤pH值的相关性关系:

表3-4 土壤酸碱性与土壤营养元素间相关性分析

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土层 | 火烧强度 | Cu | Zn | Mn | K |
| 0-10cm | 对照组 | 0.253 | 0.990 | 0.902 | 0.906 |
| 轻度火烧 | -0.997\* | -0.582 | -0.684 | 0.933 |
| 中度火烧 | -0.349 | -0.193 | 0.973 | -0.386 |
| 重度火烧 | -0.315 | -0.999\* | 0.549 | 0.911 |
| 10-20cm | 对照组 | 0.995 | -0.079 | 0.996 | -0.943 |
| 轻度火烧 | 0.707 | -0.208 | -0.252 | 0.708 |
| 中度火烧 | 0.993 | 0.995 | -0.673 | 0.987 |
| 重度火烧 | 0.410 | -0.717 | 0.702 | -0.279 |
| 20-30cm | 对照组 | 0.839 | 0.846 | -0.054 | -0.494 |
| 轻度火烧 | -0.70 | 0.486 | -0.806 | -0.546 |
| 中度火烧 | 0.546 | -0.618 | 0.989 | 0.050 |
| 重度火烧 | 0.896 | 0.478 | -0.007 | -0.941 |

由图3-4可知，土壤酸碱性在0-10cm土层轻度火烧情况下与Cu元素含量有显著相关性，且呈显著负相关；土壤酸碱性在0-10cm土层中度火烧情况下与Zn元素含量具有显著相关性，且成显著负相关，土壤酸碱性与Mn、K元素含量之间未发现显著相关关系。

表3-5 土壤营养元素间的相关性分析

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 营养元素 | Cu | Zn | Mn | K |
| Cu | 1 | 0.640\*\* | 0.677\*\* | -0.238 |
| Zn |  | 1 | 0.528\*\* | 0.422\* |
| Mn |  |  | 1 | 0.090 |
| K |  |  |  | 1 |

注:\*表示相关性达显著水平 (P<0.05) ，\*\*表示相关性达极显著水平 (P<0.01)。

Cu、Zn、Mn、K四种营养元素相关性分析如表3-5所示，表3-5为去除火烧强度和土层深度因素，对土壤养分之间的关系进行分析所得结果，具体表现为：Cu元素与Zn元素含量间相关性极显著（P＜0.01）；Cu元素与Mn元素含量间相关性极显著；Zn元素与Mn元素含量间相关性极显著；Zn元素与K元素含量间相关性极显著。

4讨论

## 4.1不同火烧强度对Cu、Zn、Mn元素含量的影响

土壤Cu、Zn、Mn元素含量在不同火烧干扰情况下差异显著(P<0.05)。Cu、Zn两种元素含量在不同火烧程度干扰后具有相似变化：在轻度、中度火烧干扰后，Cu、Zn元素含量明显高于对照水平，在重度火烧干扰情况下，土壤底层Cu、Zn元素含量低于对照组，说明火烧程度较大时，植物体内的Cu、Zn元素向土壤中释放的程度和速度减缓，极有可能是植物本身结构被火烧破坏所造成，或者是重度火烧使土壤板结、土壤密度增加，土壤孔隙度和土壤含水率降低等原因所导致。Mn元素含量在轻度火烧干扰时显著增大，在中度、重度火烧干扰时都有不同程度的减少，并且随着土层深度增加，Mn元素含量会有显著减少。

总体来说，Cu、Zn、Mn三者元素含量随火烧程度的增大大致都呈下降趋势，因为随着火烧程度的增大，土壤温度升高，对土壤结构的破坏力增大，随即降低了土壤渗透率和通透性，且油松含有树脂松油，有助于燃烧，因此油松林燃烧后土壤理化性质的改变比普通林分更大。火烧程度增大，土壤pH、含水量、有机质含量也会变化，对微量元素的影响也会增大，另外考虑到燃烧后灰分的挥发以及雨水的冲刷，土壤整体性质都会受到很大影响。针对不同土层深度火烧强度的影响，林火燃烧地表的枯枝落叶，产生的灰分往下渗透，10-20cm深土层由于有表层土壤的保护所以火烧破坏较轻，同时有机质的分解和灰分的补充，使得10-20cm深土层Cu、Zn、Mn等微量元素含量有所增加；20-30cm深土层会受到林火的破坏，但是得到的上层有机质补充较少，所以含量基本呈下降趋势。

但是国内也有学者发现了不一样的上述元素变化情况，孙明学[26]在大兴安岭塔河林业局周边研究不同火烧强度以及不同来火方式对微量元素的影响，结果表明：在经历不同火烧强度干扰之后，Cu元素含量变化无规律，且数据表明了火烧强度对土壤Cu元素含量的影响并不显著；同时受到火烧干扰后的土壤Zn、Mn元素含量均低于未过火林地土壤中的Zn、Mn元素含量，并且Mn元素含量在不同火烧强度火烧干扰之后差异并不显著。由上述学者研究结果可见，在受到不同火烧干扰强度下的微量元素含量变化并未呈现一定的规律特征，会随着区域地理位置、降雨量、林分等变化而变化。

上述三种微量元素对土壤作物具有重要作用，比如促进光合作用、呼吸作用以及物质转化作用、提高作物产量、改善作物品质以及提高肥料利用率。通过本次对Cu、Zn、Mn微量元素研究发现林火对于森林土壤的影响具有双重性，对于火灾后的森林重建具有有很大的意义。当森林火灾发生之后，相关部门可以找到相对应的重建措施，根据不同的火烧程度选择合适的植被或者对缺乏的元素进行一定补充，比如在受重度火烧干扰的火烧迹地土壤层中，土壤当中的Cu、Zn、Mn元素的含量会有所降低，因此可以加以补充，将对此元素要求不高或能富集该元素的植物种植在此处；也可以根据栽培需要对种植前的土壤进行火烧，根据研究结果，一些元素在不同的火烧强度下会有不同程度的增加，因此可以根据种植作物的需要，在种植前对土壤进行一定的处理，使土壤更适合该植物。

## 4.2不同火烧强度对K元素含量的影响

轻、中度火烧土壤的K元素含量一般是增加的，这是因为火烧时有机物质释放更多的基础阳离子[27]，但这种情况一般发生于火烧初期。本次研究中，K元素含量在0-20cm土层中，在受到不同程度火烧干扰后，均表现出在中度火烧干扰情况下显著增大，轻度、重度火烧干扰显著减少的趋势，考虑是雨季较多，水土流失造成的；在20-30cm土层中，K元素在受到不同强度火烧干扰后，含量均有显著增大，总体表现出随着火烧强度增大，K元素含量先减少再增加的变化趋势。综合各个深度土层情况发现，土壤在受到轻度、中度、重度火烧干扰时，K元素含量均有一定程度的增大，尤其是在中重度火烧干扰情况下。这与岳鑫[2]等对山东半岛东部区域森林不同强度火烧迹地K元素含量变化特征相似。由此发现土壤中K元素和C、N等其他营养元素在受到火烧干扰后含量变化并不相同，K元素只存在于土壤固体组分之间，所以导致火烧干扰产生的高温不会使K元素挥发流失，且形成含钾灰分，聚集于表层的腐殖质中，导致土壤中K元素含量显著增多，尤其是在表层土壤中[28]。同时有研究表明，在重度和中度火烧干扰情况下，森林中表层植被、土壤微生物群落大量死亡，不再从土壤中摄取大量的养分来维持自身的生长发育等生命活动，此时对K元素吸收也大为降低，遗留在土壤中大量的速效K养分，这就使得中度、重度火烧干扰后K元素含量高于对照水平；而对于轻度过火的样地，情况则相反，只有一部分表层植被死亡或者受损，植被密度降低，微生物群落得以大量存活，同时火烧产生的温度进一步促进了土壤微生物活性，使得植被、微生物群体加速摄取养分进行生长发育，这就导致了植被、微生物对K元素吸收更多，故土壤下层的K元素低于对照水平[29]。

因此，K元素作为土壤中重要的速效营养元素之一，对火烧后表层植被的恢复以及微生物群落的重建具有重大意义，本次研究发现火烧之后平泉县K元素含量有一定程度变化，为了充分利用和恢复土壤中的速效钾养分，管理部门应尽快在火烧迹地上采取治理措施，进行植树造林，或者施用含钾肥料，进行植被恢复和火烧迹地重建。

## 4.3不同火烧强度对土壤pH值的影响

本研究发现，研究区域内土壤在受到不同强度火烧干扰，以及在不同土层深度情况下，土壤均表现为弱酸性。目前国内外大部分研究发现火烧干扰会使土壤pH有一定程度的增大[30]，但是孙明学对大兴安岭地区火烧迹地研究时发现，火烧强度越大，土壤越偏酸性，而未过火的样地的土壤多为弱酸性[26]。所以在不同的研究区域内，火烧强度对土壤pH的影响不尽相同，本次研究发现在不同火烧干扰强度下，土壤pH值有显著变化，且表现出在重度火烧情况下显著增大的趋势，这是因为火烧后阳离子增加和土壤有机物与枯落物氧化对有机酸消耗造成的。张炅达在对不同火烧强度影响下土壤pH值进行研究时发现，在同一土层深度条件下，随着火烧强度的增大，土壤酸碱性随之增大，而且火烧强度越大，pH值随之上升的幅度也就越大[31]。此外郭爱雪等人对不同火烧强度下马尾松林下土壤酸碱性的研究中表明：随着火烧强度的增大，土壤pH值逐渐升高，土壤中钾、氮、磷营养元素的有效性增加，进一步提高了土壤表层植被、土壤微生物的活动能力[32]。

已有结论表明，灌溉林区表层植被，能够有效降低火烧迹地中土壤酸碱性，且随着灌溉年数的增加，土壤酸碱性降低也更加显著[33]。因此通过研究火烧迹地中土壤酸碱性的变化规律，在火烧迹地种植相应的植被，施以土壤改良剂，可有效降低土壤酸碱性变化对林地造成的影响，但也应注意土壤营养元素的变化规律，同时对土壤酸碱性和土壤营养元素进行改造，以加速火灾重建及林地恢复。所以对本区域火烧迹地土壤pH值的研究，不仅为不同火烧强度的火烧迹地的恢复提供了数据支撑，而且利于同类型受到火烧干扰油松林的重建及植被恢复工作的开展。

结论

本研究以河北省平泉县天然油松林为研究对象，测定不同程度火烧迹地及不同土层深度土壤四种营养元素和pH的变化数值。研究火烧程度与土层深度对土壤Cu、Zn、Mn、K四种营养元素含量的变化、土壤pH的变化、土壤金属元素与pH之间的相关性，从而探究火烧迹地土壤营养元素与pH变化特征，为后期使用肥料及土壤改良剂对火烧迹地植被群落及土壤的恢复提供数据支持。

（1）、土壤中Cu、Zn、Mn元素含量在火烧干扰后差异显著。Cu、Zn两种元素含量在轻度、中度火烧干扰后含量显著升高，在重度火烧干扰情况下，Cu、Zn元素含量显著降低。Mn元素含量在轻度火烧干扰时显著增大，在中度、重度火烧干扰时都有不同程度的减少，并且随着土层深度增加，Mn元素含量会有显著减少。

（2）、K元素含量在表层土层深度及10-20cm土层深度中受到不同程度火烧干扰后，表现出在中度火烧干扰情况下显著增大，轻度、重度火烧干扰显著减少的趋势，在20-30cm土层中受到不同强度火烧干扰后，K元素含量均有显著增大，总体表现出随着火烧强度增大，K元素含量先减少再增加的变化趋势。

（3）、土壤在受到不同火烧强度干扰情况下，土壤pH值有不同变化，其中pH值在轻度、中度火烧变化不显著，且较为接近，但在重度火烧干扰情况下pH值显著增大。

参考文献

朱教君, 刘足根. 森林干扰生态研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15（10）：1703-1710.

岳鑫，囤兴建，崔德杰，等.不同火烧强度对森林土壤养分的影响[J].山东农业科学, 2018, 50(3): 72-76.

Certini G.Effects of fire on properties of forest soils:a review[J]. Oecologia, 2005, 143(1): 1-10.

Abril A,Barttfeld P,Bucher E H.The effect of fire and overgrazing disturbes on soil carbon balance in the Dry Chaco forest[J]. Forest Ecology&Management, 2005, 206(1/2/3): 399-405.

陶玉柱.火干扰对塔河白桦落叶松林土壤化学性质的短期影响[J]. 辽宁林业科技, 2016（3）：1-4, 18.

Dikici H,Yilmaz C. H.Peat fire effects on some properties of an artificially drained

Peatland[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(3): 866-870.

Wan C. X., Zhang X.Y. Application of fuzzy mathematies in the a ppraisal of soil quality[J]. Journal of Applied Science, 1991, 9(40); 359-365.

Peter S.Prescribed burning increased nitrogen availability in loblollystan[J]. For.Ecol.Manage. 1986, 14(l):13-22.

1. 刘西军，徐小牛，陈学玲，等. 不同类型森林土壤4种金属元素含量的研究[J]. 水土保持学报. 2009(1): 127-131.
2. 胡芳，蔺启忠，王钦军，等. 土壤钾含量高光谱定量反演研究[J]. 国土资源遥感. 2012(4): 157-162.

Adams DE, Anderson RC. The response of a central Oklahoma grassland to gburning[J]. Southwestern Naturalist, 1978, 23: 623-632.

Marion G M, Moreno J M,Oechel W C. Fire severity, ashdeposition, and clipping effeets on soil nutrients in Shaparral[J]. Soil Science Society of America journal, 1991, 55(l): 235-240.

胡海清. 林火生态与管理[M]. 中国林业出版社，2005.

殷丽. 大兴安岭林火释放碳量的估算[M]. 中国林业科学研究院，14-20.

魏云敏, 袁强. 不同强度火烧对兴安落叶松林土壤铵态氮的影响[J]. 林业科学, 2015, 40(3): 18-19.

1. 谢佰承，张春霞，薛绪掌. 土壤中微量元素的环境化学特性[J]. 农业环境科学学报. 2007(S1): 132-135.
2. 马扶林，宋理明，王建民. 土壤微量元素的研究概述[J]. 青海科技. 2009, 16(3): 32-36.

李炳怡. 林火对华北油松林土壤有机碳和养分影响[D]. 北京林业大学, 2018.

Monleon. V., Cromack Jr., K., Long-term effects of prescribed underburning on litter

decomposition and nutrient release in ponderosa pine stands in central Oregon. For. Ecol. Manage. 1996.81,143-152.

Moore, J.C., de Ruiter, P.C., Temporal and special heterogeneity of trophic interactions within below-ground food webs. In:Crossley, D.A., Coleman, D.C., Beare, M.H.,Edwards, CA.(Eds.),Modem Techniques in Soil Ecology Elsevier, Amsterdam. 1991.pp.371-398.

1. Bock C., Bock, J., Shrub densities in relation to fire, Livestock grazing, and precipitation in anArizona desert grassland. Southwest Nat. 1997.42,188-193.

Robert R.Blank and Desiderio C.Zamudio. The influence of wildfire on aqueous-extractable. Soil sohnte in forested and tet meadow ecosystems along the eastern front of the sierra-nevada range,California. IAWF.Printed in U.S.A.Int. J. Wildland Fire 1998,8(2):79-85,

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.

李国雷，刘勇，李瑞生，等. 油松人工林土壤质量的演变[J]. 林业科学, 2008(9): 76-81.

张钢民，冯天杰，杨文利等. 大窝铺林区种子植物区系的初步研究[J]. 河北林果研究, 2000(3): 201-206.

孙明学，贾炜玮，吴瑶. 大兴安岭北部地区林火对土壤化学性质的影响[J]. 东北林业大学学报. 2009, 37(5): 33-35.

Kennard D K, Gholz HL. Effects of high-and low-intensity fires on soil properties and plant growth in a Boliviandry forest[J]. Plant and Soil,2001,234:119-129.

刘冠宏，李炳怡，宫大鹏，等. 林火对北京平谷区油松林土壤化学性质的影响[J]. 北京林业大学学报. 2019, 41(2):29-40.

谷会岩，金靖博，陈祥伟,等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. 自然资源学报. 2010, 25(7):1114-1121.

Zhao Y.Wang YZ.Xu Z H,et al.Impacts of prescribed burning on soil greenhouse gas fluxes in a suburban native forest of south-eastern Queensland, Australia[J]. Biogeosciences. 2015, 12(21): 6279-6290.

1. 张炅达，张水锋，金东日，等.不同强度火烧对杨树人工林土壤pH值的即时影响[J]. 绿色科技. 2015(11): 29-31.
2. 郭爱雪，郭亚芬，崔晓阳. 大兴安岭马尾松林下土壤在不同火烧强度下的养分变化[J].东北林业大学学报. 2011(5): 69-71.
3. 王涵，王果，黄颖颖，等.pH变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境，2008, 17(6):2401-2406.

致谢

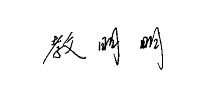
衷心感谢舒展老师对本人的精心指导。感谢环境学科和土壤实验室全体老师和同学的热情帮助和支持！经过毕业论文设计、一系列的实验和毕业论文的撰写，使我受益匪浅，丰富了林火方面的专业知识，还提高了动手能力，这与指导老师舒展老师的耐心指导是密不可分的。舒老师工作认真，耐心解答各式各样的问题，是我们学习的榜样，在此感谢舒老师及环境科学学科老师及同学的帮助。

感谢林学院老师和环境科学专业的同学们的关心和支持！感谢所有帮助过我的人！感谢我的家人！

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的毕业论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明，其它未注明部分不包含他人已发表或撰写过的研究成果，不存在购买、由他人代写、剽窃和伪造数据等学术不端行为。

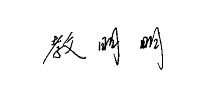
本人愿为此声明承担法律责任。

作者签名：  日期： 2023 年 6 月 11 日

**学位论文版权授权书**

本学位论文作者同意授予东北林业大学对本论文全部内容的信息网络传播权、汇编权、发行权、转授权与复制权，具体包括但不限于将学位论文上传到有关数据库，影印、缩印或扫描等手段保存、查阅、借阅、汇编等。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

作者签名：  日期： 2023 年6 月 11 日