

不同施肥措施对火烧迹地 土壤改良成效的研究*

郭宇航^{1,2}, 王建柱^{1,2}, 朱晓兰¹, 鲍涛^{1,2}, 涂威亮^{1,2}

(1. 三峡大学生物与制药学院, 湖北宜昌 443002; 2. 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北宜昌 443002)

摘要: 森林火烧迹地生态恢复是维持生态系统稳定性的关键环节, 但火烧导致土壤结构破坏、养分流失及微生物群落失衡, 严重制约了植被恢复和生态系统重建, 土壤理化性质恶化和微生物环境受损已成为限制火烧迹地生态修复的主要障碍。本研究以宜昌市火烧迹地土壤为对象, 通过外源养分添加的方法改良火烧迹地土壤, 并采用主成分分析 PCA (Principal component analysis)-熵权-TOPSIS (Technique for order preference by similarity to an ideal solution) 方法进行综合评价, 旨在比较不同施肥策略对关键土壤指标的快速调控效应差异, 解析限制其生态恢复的关键限制因素。结果显示, 不同施肥措施对火烧迹地土壤的改良效果不同: 化肥与有机肥同施不仅可以显著改变土壤理化性质, 如增加土壤孔隙度 (增加幅度在 59.71%~143.50% 之间)、改良土壤酸碱性环境、显著提升土壤有机碳、增加全氮和全磷含量并改良土壤团聚体结构, 而且还改善了土壤的微生物环境, 其中, 化肥+鸡粪 120 t/hm²组、化肥+羊粪 120 t/hm²组和化肥+猪粪 120 t/hm²组对土壤团聚体结构、有机碳含量和微生物生物量磷等指标改良成效最为显著。通过 PCA-熵权-TOPSIS 方法对土壤改良成效进行排序, 从高到低依次为: 化肥+鸡粪 120 t/hm²组、化肥+羊粪 120 t/hm²组、化肥+猪粪 120 t/hm²组、化肥+羊粪 60 t/hm²组、化肥+猪粪 60 t/hm²组、化肥+牛粪 120 t/hm²组、化肥+鸡粪 60 t/hm²组、化肥+牛粪 60 t/hm²组、单施化肥组、完全不施肥组。研究结果为火烧迹地生态修复的科学施肥提供了理论依据, 高浓度鸡粪、羊粪及猪粪等的施用是火烧迹地土壤修复的优选措施。

关键词: 火烧迹地; 施肥处理; 土壤团聚体; 土壤微生物生物量; PCA-熵权-TOPSIS 方法

中图分类号: S714.8 **文献标志码:** A

火灾是森林生态系统主要的干扰因素之一^[1], 联合国已将大面积的森林火灾列入全球八种自然灾害名单。随着全球气候变暖加剧, 预计全球森林受到火灾影响的面积将增加约 29%^[2]。火灾使土壤孔隙度降低、pH 值改变, 导致氮和磷等养分的挥发, 进而影响土壤的养分供应能力及微生物活性^[3], 而且高温会破坏土壤结构, 降低土壤团聚体的稳定性, 从而降低土壤的水肥保持能力^[4]。此外, 火灾还会导致地表有机物和植被覆盖的丧失, 减少土壤表层的保护层, 进而加剧风蚀和水蚀的风险^[5]。因此, 火灾对森林生态系统的破坏通常是剧烈的, 在极端条件下甚至是不可逆的。由于火灾对土壤的破坏会直接削弱森林自我修复的能力, 火灾后的土壤修复尤为重要。必要的人工干预可以恢复土壤性质、促进生态系统的正向演替和森林地区社会生态系统的可持续发展。

* 收稿日期: 2025-05-20; 修回日期: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51179094); 中国工程科技发展战略湖北研究院咨询项目 (HB2022C15)

作者简介: 郭宇航 (2000—), 女, 湖北十堰人, 2022 级硕士研究生。E-mail: 15897532418@163.com

通信作者: 王建柱 (1976—), 男, 湖北宜昌人, 教授, 博士。主要从事恢复生态学研究。E-mail: wangjianzhu@

126.com

有机物添加和各种类型的覆盖物通常应用于减少森林火灾后的土壤侵蚀^[6-8]。研究表明,一些有机材料,尤其是有机肥的施用,能够有效改善退化土壤^[9],具体而言,有机肥的施用可以显著增加土壤中的有机质含量。有机质通过胶结作用使土壤颗粒黏结成更大且更稳定的团聚体,从而改善土壤的结构和通气性。有机质还能刺激土壤微生物的繁殖活动,使其产生有助于团聚体形成与稳定的多糖等黏结剂。此外,有机肥的施用还可以改善土壤的养分平衡,调节土壤pH值,进而影响土壤中养分的有效性。阿根廷森林灾后恢复的研究发现,有机添加物(堆肥)能够显著改善森林火灾后的土壤理化性质^[10]。值得指出的是,有机肥与化肥共同施用有时可能比单施化肥更有效^[11]。研究表明,有机肥施用在减少化肥的使用、增加有机投入、改善土壤健康和提高作物产量方面具有一定的潜力,同时对环境的潜在负面影响较小^[12]。畜禽粪便有机肥因其来源广、肥效长和养分丰富等特点,成为一种重要的土壤改良材料。同时,在绿色发展的大背景下,推动畜禽粪便资源化利用已成为明确方向。因此,研究施用通过畜禽粪便制作的有机肥对火烧土壤的修复具有重要的理论与实践意义。

宜昌市是我国森林火灾高风险区,地处长江中下游,森林资源丰富,森林蓄积量为9641万 m^3 ,森林覆盖率达59.39%,山区面积占国土面积的70%。三峡电网覆盖面广,雷电等自然天气容易引发火花,进而引发森林火灾。作为旅游城市,宜昌市因游客增多和传统用火习惯而面临火源管理难题,同时,广泛的公路网络和丰富的山林绿地进一步加大了当地的火灾风险。2019—2023年,宜昌全境共发生火灾36起,其中林地火灾15起,灾后恢复任务艰巨。宜昌境内的森林以常绿针阔混交林为主,其土壤具有土层浅薄、呈强酸性等典型特点,浅薄土层在植被烧毁后极易加剧水土流失,导致珍贵表土及养分快速流失;而强酸性环境不仅本身养分有效性低,且火灾初期灰分带来的短暂中和效应也会因本地丰沛降雨而迅速淋失,进而引发酸度反弹,严重抑制植物根系重建与生长。因此,深入理解这一特殊土壤条件并制定对策是实现宜昌及类似长江中下游针阔混交林火灾后有效生态恢复的关键。

尽管我国关于火烧干扰及土壤修复措施的研究取得了一定进展,但相关研究大多集中在东北大兴安岭等北方林区^[13],对松类占优势的长江中游地区火烧迹地土壤修复的研究仍处于起步阶段,缺乏关于火烧迹地土壤相关理论研究和技術方法。因此,本研究通过原位添加方法对宜昌市当阳百步梯中度火烧迹地土壤进行施肥处理,分析不同施肥处理对火烧后土壤理化性质、团聚体结构及稳定性、微生物生物量的影响,然后采用PCA-熵权-TOPSIS方法综合评价不同施肥措施对火烧迹地土壤的修复成效,旨在揭示不同施肥策略对关键土壤指标的快速调控效应,为长期恢复路径提供基础数据及科学依据与参考。本研究旨在回答以下两个关键科学问题:(1)不同施肥措施对改良火烧迹地土壤理化性质、团粒结构及稳定性、微生物生物量等有何影响;(2)采用哪种施肥措施效果最优。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

试验区位于湖北省宜昌市当阳市王店镇木店村九组(30°76′60″N,111°71′12″E,海拔为120 m)。研究区属于典型的亚热带季风气候,年均气温为17.5℃,年均降水量为1261.1 mm,年均日照时数为1674.7 h。植被类型以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、白栎(*Quercus fabri* Hance)和楝(*Melia azedarach* L.)为主。林火发生于2022年3月,过火面积约20000 m^2 。

1.2 试验材料

试验所用的化肥为史丹利公司生产的磷酸二氢钾肥(磷(P_2O_5):52%,钾(K_2O):34%),并补充施用尿素(N含量为46%),有机肥为济南金盛化工有限公司生产的腐熟鸡粪、牛粪、羊粪和猪粪,其基本理化性质见表1。

1.3 试验设计

采用二因素完全随机区组试验设计,两个处理因素分别为:①有机肥组合类型;②有机肥施用量。其中有机肥组合类型分为4种:化肥+鸡粪组(Ch)、化肥+牛粪组(Ca)、化肥+羊粪组(S)和化

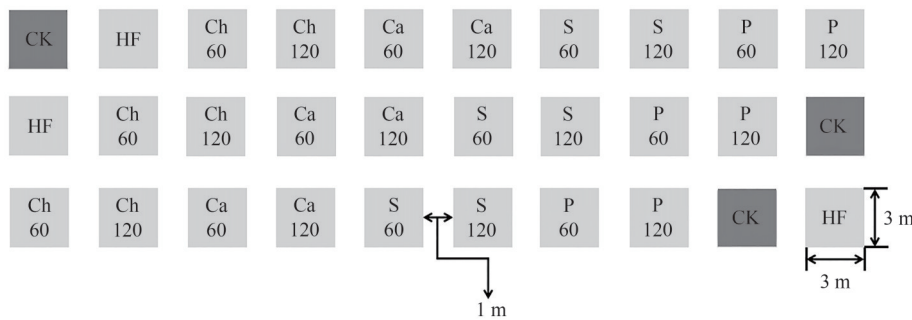
肥+猪粪组(P)。有机肥施用量包括 60 t/hm²和 120 t/hm²两个水平。试验采用两种对照组,其中,完全不施肥为阴性对照组(CK),只施用化肥为阳性对照组(HF)。试验组设置 3 个重复(图 1),共设置 30 个小区,每个小区的面积为 9 m²(3 m×3 m)。小区之间保持 1 m 的间隔,以保持各个小区之间的独立性(图 1)。其中,化肥施用方法:按 1 g 化肥兑 2 L 水的比例溶解,并使用喷壶将其均匀喷洒于土壤表面。每年在生长季初期一次性施肥。化肥施用完成后,间隔 15 d 施用有机肥。有机肥施用方式亦采用溶液形式:将充分腐熟的鸡粪、牛粪、羊粪和猪粪有机肥按相应浓度配制水溶液,使用喷壶均匀喷洒于土壤表面,使养分能够通过水分渗透进入土壤层,不对原有土壤结构造成明显扰动。

表 1 供试有机肥基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested organic fertilizer

肥料种类	pH	全氮/%	全磷/%	全钾/%	有机质/(g·kg ⁻¹)
鸡粪	8.14	2.88	2.35	2.24	202.47
牛粪	7.85	2.18	0.62	0.58	128.76
羊粪	7.92	2.14	1.22	1.86	199.24
猪粪	7.54	1.68	1.64	0.81	156.18

注:全磷、全钾含量分别以 P₂O₅、K₂O 计。



注:CK、HF、Ch60、Ch120、Ca60、Ca120、S60、S120、P60、P120 分别表示完全不施肥的阴性对照组、单施化肥组、化肥+鸡粪 60 t/hm²组、化肥+鸡粪 120 t/hm²组、化肥+牛粪 60 t/hm²组、化肥+牛粪 120 t/hm²组、化肥+羊粪 60 t/hm²组、化肥+羊粪 120 t/hm²组、化肥+猪粪 60 t/hm²组、化肥+猪粪 120 t/hm²组。

图 1 样地分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sample plot distribution

1.4 指标测定及方法

在每个小区内,采用“S”形多点取样法,随机采集 8~10 个点的耕层 0~20 cm 原状土样,混合均匀。采样时去除土壤中的植物残体、动物和石砾等杂物,将土样装入硬质塑料盒,带回实验室进行分析。采集到的土样分为 3 份:1 份用于测定土壤的基础理化性质,包括土壤孔隙度(烘干法)、土壤 pH (pH 计测定法)、土壤有机碳含量(重铬酸钾氧化-外加热法)、土壤全氮含量(凯氏定氮法)、土壤全磷含量(钼锑抗比色法);1 份用于测定土壤团粒结构,采用湿筛法对团聚体进行物理分组;1 份采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物生物量碳及生物量磷。土壤团聚体及微生物量的测定方法具体如下。

(1) 机械稳定性团聚体(干筛):取 2 kg 风干后的混合土样,通过孔径顺次为 10、7、5、3、2、1、0.5、0.25 mm 的筛组进行干筛,将各粒级团聚体分别称量(精确至 0.01 g)并记录,计算各粒级机械稳定性团聚体占土样总量的百分含量。

(2) 水稳定性团聚体(湿筛):根据干筛法求得的各级团聚体的百分含量,将样品按比例配成 50 g,然后放入沉降筒中,加入水至水分饱和,浸泡 10 min 将孔径顺次为 2、1、0.5、0.25 mm 的筛子套入水

桶中进行湿筛,清洗出水稳定性团聚体并烘干称重,计算各级水稳定性团聚体的重量及其含量百分比。

(3) 土壤平均重量直径(Mean weight diameter of soil, MWDS)定义为 $X_{MWDS} = \sum X_i W_i$, 式中, X_i 为第 i 级筛孔的平均粒径(mm), W_i 是该级筛孔的团聚体质量占总团聚体质量的比例。

(4) 土壤微生物生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)的测定采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提,土壤微生物生物量磷(Soil microbial biomass phosphorus, SMBP)的测定采用氯仿熏蒸- $NaHCO_3$ 浸提,钼蓝比色法测定^[14]。

1.5 数据分析

本研究所涉及的统计分析和作图均在 R v4.3.1 上完成,主要包括以下四个部分:(1)方差分析(Analysis of variance, ANOVA):采用双因素方差分析检验两个因素的主效应及其交互作用(因子一为肥料组合类型,因子二为有机肥施用量水平),并探究相较于完全不施肥的阴性对照组,不同施肥方式对火烧迹地土壤理化性质、团聚体结构及稳定性、微生物生物量的影响。(2)Tukey 多重比较:在方差分析基础上,进一步对各处理效果之间的差异进行逐对检验。(3)主成分分析(PCA)和熵权法:通过 prcomp 函数进行主成分分析,提取数据中主要变异信息,计算各指标的信息熵值;根据熵权法确定各指标在综合评价中的权重。(4)TOPSIS 排序法:在完成指标赋权后,采用 TOPSIS(趋近理想解排序法)计算各处理与理想解之间的相对距离,确定综合得分并进行排名。

2 结果与分析

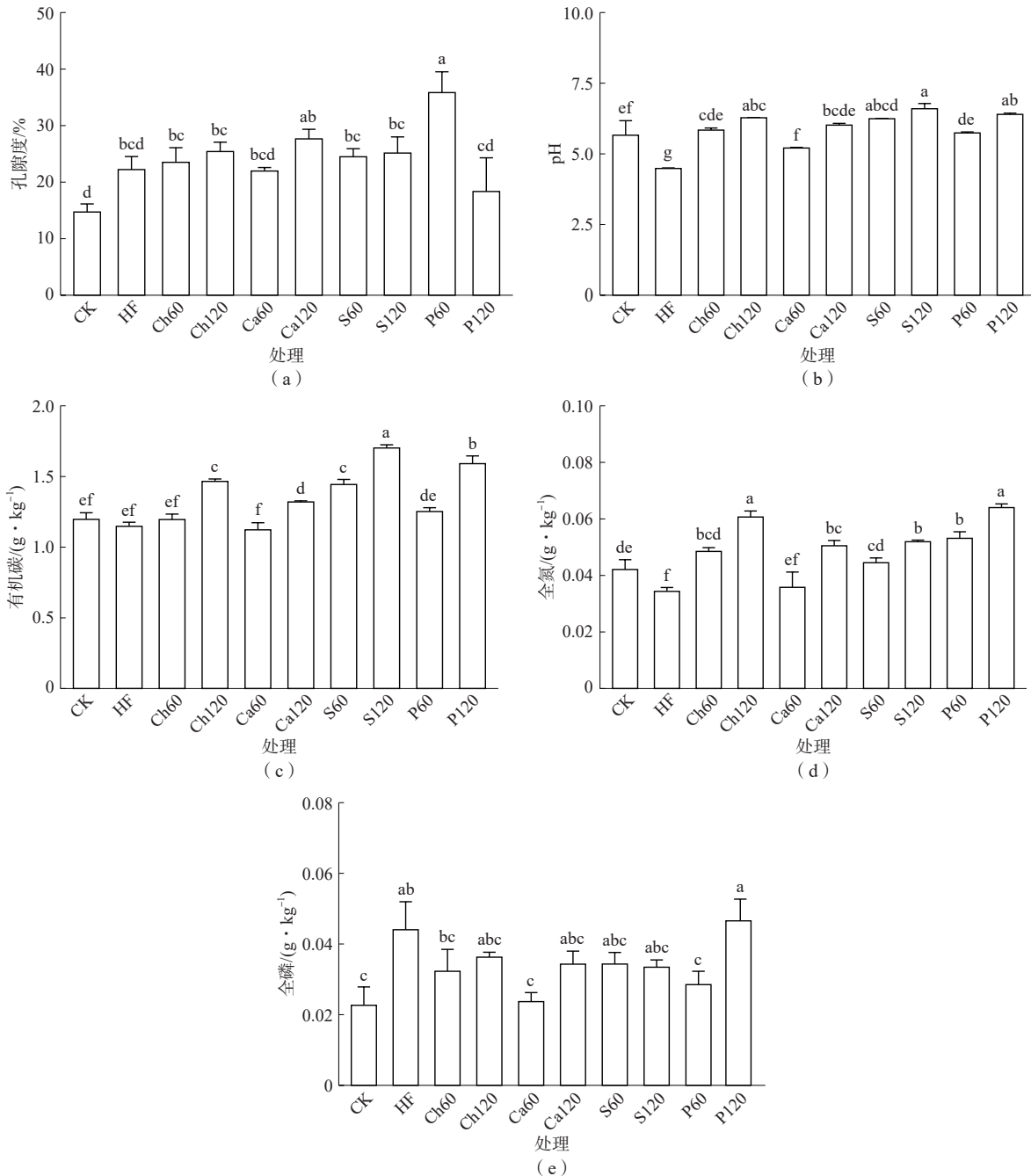
2.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

双因素方差分析结果显示,肥料类型与施肥浓度对土壤部分指标均存在显著主效应和交互效应,肥料类型设定5个水平(化肥、鸡粪、牛粪、猪粪、羊粪),自由度为5;施肥浓度设定2个水平(60 t/hm²和120 t/hm²),自由度为1;二者交互作用自由度为5,误差项自由度为24。统计模型结构完整,方差分析自由度分配合理,确保了模型检验效力和结果可靠性。

方差分析结果表明,与完全不施肥的阴性对照组相比,不同处理措施对土壤理化性质的影响有一定的差异性。如图2(a)所示,化肥+鸡粪60 t/hm²组和化肥+猪粪60 t/hm²组等土壤孔隙度显著增加59.71%~143.50%。双因素交互作用分析结果显示,肥料类型与施肥浓度对孔隙度存在显著交互作用($F=5.946, P<0.01$)。如表2和图2(a)所示,在60 t/hm²浓度水平下,化肥+猪粪组显著高于其他处理,表明其对孔隙度的提升作用最强;而在120 t/hm²浓度下,各肥料类型间差异不显著,说明高浓度施肥下肥料类型对孔隙度的调节效应趋于一致。

单施化肥组的土壤pH相较于完全不施肥的阴性对照组显著降低20.79%,表明化肥的酸化效应明显;化肥+羊粪60 t/hm²组和化肥+鸡粪120 t/hm²组等可使pH显著提高10.31%~16.55%,见图2(b)。双因素方差分析结果显示,不同肥料类型及施肥浓度对pH均具有显著影响($P<0.05$),且二者存在显著交互作用($F=3.653, P<0.05$)。如表2和图2(b)所示,在60 t/hm²浓度水平下,化肥+羊粪组的改良能力显著高于其他处理,化肥+牛粪组最低;在120 t/hm²浓度水平下,化肥+羊粪组依然保持优势,但与化肥+猪粪组、化肥+鸡粪组间的差异减小,说明高浓度下各有机肥的改良能力趋于一致。

化肥+牛粪120 t/hm²组和化肥+羊粪120 t/hm²组等土壤有机碳含量相较于完全不施肥的阴性对照组显著增加10.29%~42.20%,见图2(c)。双因素方差分析结果表明,肥料类型和施肥浓度对有机碳含量均具有极显著主效应($P<0.01$),但交互作用不显著。如表2和图2(c)所示,在肥料类型方面,化肥+羊粪组的有机碳含量显著高于其他组($P<0.01$),化肥+鸡粪组与化肥+猪粪组间差异不显著,但两者均显著高于化肥+牛粪组。在施肥浓度方面,随着浓度由60 t/hm²升至120 t/hm²,有机碳含量呈极显著正向增加趋势。



注:不同小写字母表示各处理间的差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties

相较于完全不施肥的阴性对照组,单施化肥组土壤全氮含量显著降低 18.37%,化肥+牛粪 120 t/hm²组和化肥+猪粪 120 t/hm²组等全氮含量显著增加 19.95%~52.02%,见图 2(d)。双因素方差分析结果显示,肥料类型与施肥浓度对全氮含量均具有极显著主效应($P < 0.01$),但二者交互作用不显著。如表 2 和图 2(d)所示,在肥料类型方面,化肥+猪粪组的全氮含量显著高于其他组,化肥+鸡粪组显著高于化肥+牛粪组;在施肥浓度方面,随着施肥浓度的升高,全氮含量呈显著正向增加趋势。由此可见,在提高火烧迹地土壤全氮水平方面,化肥+猪粪的协同效应最为明显,其次为化肥+鸡粪,而单施化肥则易导致土壤氮素流失。

表2 肥料类型及施肥浓度对火烧迹地土壤理化性质的方差分析结果
Table 2 ANOVA results for the effects of fertilizer type and application concentration on soil physicochemical properties in burned land

因素	孔隙度/%		pH		有机碳/(g·kg ⁻¹)		全氮/(g·kg ⁻¹)		全磷/(g·kg ⁻¹)	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
肥料类型	0.325	0.807	37.071	0.004**	35.709	0.003**	15.067	0.002**	1.555	0.239
施肥浓度	1.187	0.292	107.589	0.003**	114.327	0.007**	41.316	0.006**	7.903	0.012*
肥料类型× 施肥浓度	5.946	0.006**	3.653	0.035*	1.364	0.289	0.741	0.543	2.121	0.137

注:F为方差分析值,*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。

如表2和图2(e)所示,单施化肥组土壤全磷含量较完全不施肥的阴性对照组显著增加94.40%,化肥+羊粪120 t/hm²组全磷含量显著增加105.52%。施肥浓度对土壤全磷含量具有显著主效应($P<0.05$),但肥料类型主效应及肥料类型和浓度的交互作用均不显著。Tukey多重比较结果进一步指出,不同有机肥类型之间在全磷提升效果上无显著差异。

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体结构及稳定性的影响

与完全不施肥的阴性对照组相比,不同施肥措施显著影响了土壤的团聚体结构及稳定性。不同处理对于土壤团聚体结构影响结果显示,化肥+羊粪120 t/hm²组土壤中大于2.00 mm团聚体占比显著增加225.24%,其余各处理对于改善土壤中大于2.00 mm团聚体占比均无明显效果。化肥+羊粪120 t/hm²组、化肥+猪粪120 t/hm²组和化肥+鸡粪120 t/hm²组土壤中1.00~2.00 mm团聚体占比显著增加119.38%~183.64%。化肥+牛粪60 t/hm²组土壤中0.25~1.00 mm团聚体占比显著增加45.55%,其余各组对于改善土壤中0.25~1.00 mm团聚体的占比效果均无明显变化。化肥+羊粪120 t/hm²组、化肥+鸡粪120 t/hm²组、化肥+羊粪60 t/hm²组和化肥+牛粪60 t/hm²组土壤中小于0.25 mm团聚体占比显著减少45.65%~47.71%(表3)。但肥料类型及施肥浓度对土壤团聚体粒级结构的交互作用并不显著。不同肥料类型和施肥浓度对各粒级土壤团聚体的百分含量影响存在差异。其中,1.00~2.00 mm粒径级团聚体的含量受肥料类型和施肥浓度的单因素影响均达到显著水平($P<0.05$),说明该粒径级团聚体对施肥措施较为敏感。而对于大于2.00 mm、0.25~1.00 mm及小于0.25 mm粒径级团聚体的含量,肥料类型、施肥浓度及二者交互作用均未达到显著水平。此外,所有粒径级团聚体含量在肥料类型与施肥浓度的交互作用下均未表现出显著差异(表4)。

通过分析土壤团聚体中大于0.25 mm团聚体的占比($X_{WR0.25}$)和土壤平均重量直径(X_{MWDS}),解释不同施肥措施对土壤团聚体稳定性的影响,结果表明,与完全不施肥的阴性对照组相比,化肥+羊粪120 t/hm²组和化肥+牛粪60 t/hm²组等土壤团聚体中大于0.25 mm团聚体的占比显著增加47.67%~49.83%,见图3(a)。双因素方差分析显示,肥料类型与施肥浓度的交互作用均不显著,Tukey多重比较亦未检出各有机肥之间差异,这表明不同畜禽粪便在相同浓度水平下对大团聚体比例的促进作用大体一致(表5)。仅化肥+羊粪120 t/hm²组土壤平均重量直径较完全不施肥的阴性对照组显著增加96.84%,其余各组对于改善土壤平均重量直径并无明显效果,见图3(b)。

2.3 不同施肥处理对土壤微生物生物量的影响

不同施肥处理对土壤微生物生物量有显著影响。与完全不施肥的阴性对照组相比,化肥+鸡粪120 t/hm²组土壤微生物生物量碳含量显著增加133.78%,其余各处理未见显著改善,见图4(a);双因素方差分析结果表明,肥料类型与施肥浓度间存在显著交互作用($P<0.05$),在60 t/hm²浓度下,各肥料配施组间差异不显著;在120 t/hm²浓度下,化肥+猪粪组土壤平均重量直径显著高于化肥+羊粪组,且低于化肥+鸡粪组(该组最高),由此可见,化肥与高浓度鸡粪配施最有利于增强火烧迹地土壤的微生物群落活力及碳储量,见表5和图4(a)。

表3 不同施肥处理对土壤团聚体粒径级质量分数分布的影响

Table 3 Influence of different fertilization treatments on the mass fraction distribution of soil aggregate size classes

处理	粒径/mm			
	>2.00	1.00~2.00	0.25~1.00	<0.25
CK	0.06±0.05 b	0.019±0.005 de	0.41±0.11 b	0.51±0.15 a
HF	0.06±0.04 b	0.025±0.011 cde	0.41±0.05 b	0.50±0.09 a
Ch60	0.13±0.07 ab	0.034±0.008 bcd	0.49±0.07 ab	0.35±0.01 ab
Ch120	0.14±0.02 ab	0.054±0.002 a	0.53±0.19 ab	0.27±0.18 b
Ca60	0.12±0.05 ab	0.016±0.014 e	0.60±0.04 a	0.27±0.07 b
Ca120	0.09±0.07 ab	0.030±0.012 bcde	0.47±0.12 ab	0.41±0.05 ab
S60	0.15±0.09 ab	0.034±0.014 bcd	0.55±0.11 ab	0.27±0.05 b
S120	0.19±0.04 a	0.042±0.004 abc	0.49±0.06 ab	0.28±0.10 b
P60	0.14±0.00 ab	0.036±0.006 abcd	0.44±0.12 ab	0.39±0.13 ab
P120	0.15±0.11 ab	0.044±0.019 ab	0.41±0.09 b	0.39±0.07 ab

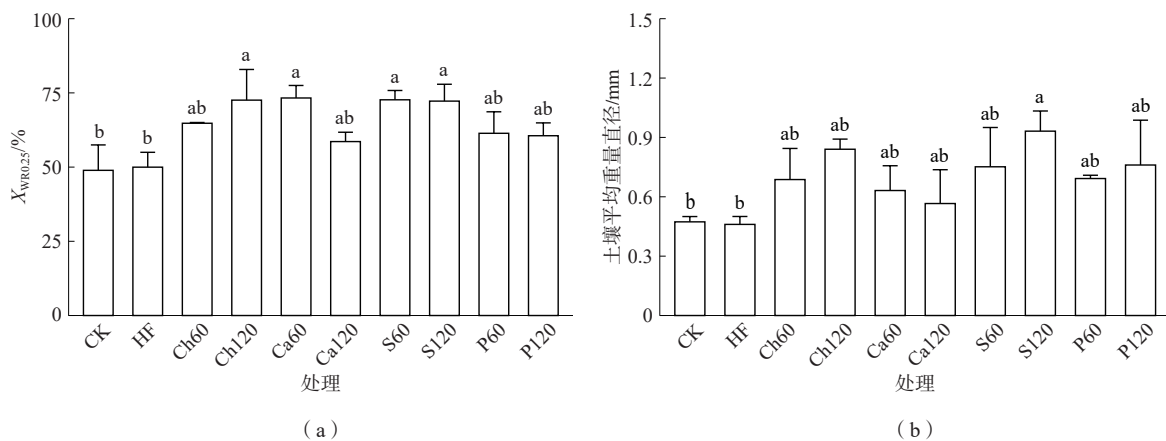
注:不同小写字母表示各处理间的差异显著($P<0.05$)。

表4 肥料类型及施肥浓度对土壤团聚体粒径组成的方差分析结果

Table 4 ANOVA results for the effects of fertilizer type and application concentration on soil aggregate size distribution

因素	粒径/mm							
	>2.00		1.00~2.00		0.25~1.00		<0.25	
	F	P	F	P	F	P	F	P
肥料类型	1.024	0.408	4.161	0.023*	1.198	0.342	1.504	0.251
施肥浓度	0.164	0.691	7.213	0.016*	0.946	0.345	0.269	0.611
肥料类型×施肥浓度	0.315	0.814	0.409	0.749	0.680	0.577	1.403	0.278

注:F为方差分析值,*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。



注:不同小写字母表示各处理间的差异显著($P<0.05$)。

图3 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

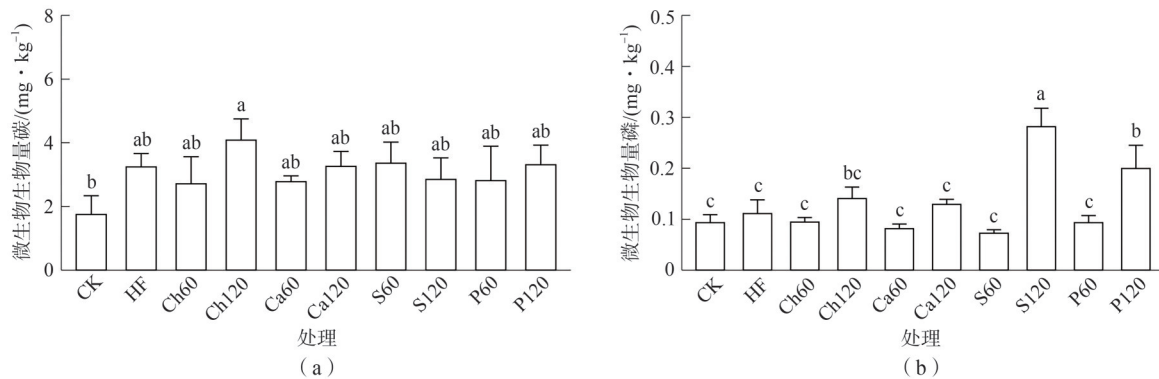
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil aggregate stability

表5 肥料类型及施肥浓度对土壤团聚体稳定性及微生物生物量的方差分析结果

Table 5 ANOVA results for the effects of fertilizer type and application concentration on soil aggregate stability and microbial biomass

因素	$X_{WR0.25}$		X_{MWDS}		X_{SMBC}		X_{SMBP}	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
肥料类型	1.504	0.251	0.946	0.442	0.700	0.566	3.736	0.033*
施肥浓度	0.269	0.611	0.649	0.432	14.443	0.002**	38.041	0.000***
肥料类型×施肥浓度	1.403	0.278	0.282	0.838	4.411	0.019*	5.325	0.009**

注:*F*为方差分析值,*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。



注:不同小写字母表示各处理间的差异显著($P<0.05$)。

图4 不同施肥处理对土壤微生物生物量碳和磷的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass carbon and phosphorus

化肥+羊粪 120 t/hm²组和化肥+猪粪 120 t/hm²组土壤微生物生物量磷含量较完全不施肥的阴性对照组显著增加 77.34% 和 78.65%, 见图 4(b), 双因素方差分析结果显示, 肥料类型与施肥浓度间存在极显著交互作用($P<0.01$)。在 60 t/hm²浓度下, 不同肥料处理间差异不显著; 在 120 t/hm²浓度下, 化肥+羊粪组显著高于化肥+鸡粪组和化肥+牛粪组, 与化肥+猪粪组差异不显著, 说明在高施肥浓度水平下, 羊粪与化肥的协同作用对促进土壤微生物生物量磷素积累最为有效, 见表 5 和图 4(b)。

2.4 基于PCA-熵权-TOPSIS方法对不同施肥处理的比较

2.4.1 PCA提取指标

选择孔隙度、pH、 X_{MWDS} 、土壤团聚体结构指标(大于 2.00 mm 团聚体、1.00~2.00 mm 团聚体、0.25~1.00 mm 团聚体和小于 0.25 mm 团聚体)、有机碳、全氮、全磷、微生物生物量碳和微生物生物量磷共 12 个指标, 根据各指标差异系数以及相关指标建立评价体系, 数据标准化后进行主成分分析。对各项指标数据进行 KMO 检验(Kaiser meyer olkin, KMO)和巴特利特球形检验(Bartlett), $KMO=0.58>0.5$, $P<0.01$, 说明数据适合进行主成分分析。如表 6 所示, 提取出 3 个主成分, 累计方差贡献率达到 81.70%, 代表了绝大部分原始指标信息。

2.4.2 熵权法赋值及 TOPSIS 方法排序

运用熵权法计算主成分矩阵权重(表 7), 结果显示, 微生物生物量磷、0.25~1.00 mm 团聚体、有机碳、微生物生物量碳所占权重较大, 说明上述指标对评价结果影响较大。通过 TOPSIS 分析各处理措施逼近最优解距离($D+$)、逼近最差解距离($D-$)及相对接近程度($C1$), 评价结果表明, 化肥+鸡粪 120 t/hm²组综合效果最优(表 8)。与完全不施肥的阴性对照组比较, 各处理对土壤各指标的改良成效从高到底排序依次为: 化肥+鸡粪 120 t/hm²组、化肥+羊粪 120 t/hm²组、化肥+猪粪 120 t/hm²组、

化肥+羊粪 60 t/hm²组、化肥+猪粪 60 t/hm²组、化肥+牛粪 120 t/hm²组、化肥+鸡粪 60 t/hm²组、化肥+牛粪 60 t/hm²组、单施化肥组、完全不施肥组。

表6 评价指标的特征值和累计方差贡献率

Table 6 Characteristic values and cumulative variance contribution rates of evaluation indicators

主成分	特征值	方差解释率/%	累计方差贡献率/%
1	6.248	52.06	52.06
2	2.494	20.78	72.85
3	1.062	8.85	81.70

表7 熵权法计算结果及赋值

Table 7 Results and assignment of entropy weight method calculation

指标	熵值	差异系数	权重
微生物生物量磷	0.780	0.220	0.139
0.25~1.00 mm 团聚体	0.814	0.186	0.118
有机碳	0.828	0.172	0.109
微生物生物量碳	0.830	0.170	0.107
土壤平均重量直径	0.879	0.121	0.077
全磷	0.882	0.118	0.075
>2.00 mm 团聚体	0.887	0.113	0.072
<0.25 mm 团聚体	0.891	0.109	0.069
1.00~2.00 mm 团聚体	0.895	0.105	0.067
孔隙度	0.914	0.086	0.055
pH	0.937	0.063	0.040

表8 TOPSIS综合得分排序

Table 8 TOPSIS comprehensive score ranking

处理	D^+ (逼近最优解距离)	D^- (逼近最差解距离)	$C1$ (相对接近程度)	名次
Ch120	0.103	0.219	0.680	1
S120	0.124	0.239	0.660	2
P120	0.143	0.208	0.591	3
S60	0.145	0.181	0.554	4
P60	0.161	0.153	0.487	5
Ca120	0.172	0.127	0.424	6
Ch60	0.194	0.133	0.407	7
Ca60	0.228	0.143	0.386	8
HF	0.250	0.072	0.224	9
CK	0.280	0.052	0.156	10

3 讨论

本研究结果表明,与完全不施肥的阴性对照组相比,部分有机肥与化肥配施处理(化肥+鸡粪 60 t/hm²组、化肥+羊粪 60 t/hm²组和化肥+羊粪 120 t/hm²组等)显著提高了土壤孔隙度。这与张沛祯等^[15]

的研究一致,其原因可能是粪肥中的有机质在土壤中分解、迁移和转化,生成多糖和腐殖质等松软多孔的物质,这些物质增加了土壤孔隙度^[16]。同时,不同肥料类型和施肥浓度对孔隙度的影响存在差异,在60 t/hm²水平下,化肥+猪粪处理对孔隙度的提升效果显著优于化肥+鸡粪处理,可能是因为猪粪富含半纤维素和易分解有机质,分解过程中生成的多糖类胶结物更有利于孔隙形成。而鸡粪氮含量较高,低施用量也存在氮素淋失的风险,抑制微生物(尤其是真菌)对团聚体结构的贡献。高施用量(120 t/hm²)水平下,各类粪肥均可提供充足有机质,满足土壤结构改善所需,从而使不同处理间差异不显著。在pH变化方面,不同处理呈现出不同结果。单施化肥组显著降低土壤pH,主要原因在于化肥溶解后释放氢离子,导致土壤酸化,同时磷酸根与土壤中的钙和镁等阳离子反应,生成不溶性磷酸盐,进一步释放氢离子,从而加剧酸化效应^[17]。而化肥与有机肥配施处理的pH显著上升可能与有机肥中含有的碱性物质直接中和土壤酸性,以及改善土壤结构、增强通气性,间接缓解酸性积累相关。此外,不同有机肥类型和施用量对土壤pH的调节能力存在差异。在60 t/hm²施用水平下,化肥+羊粪处理的pH中和效果最显著,可能是由于羊粪中含有较高的灰分和碱性碳酸盐,能迅速中和土壤酸性;牛粪因C/N高和分解速率慢,初期释放的碱性物质较少,调节能力相对较弱。而在120 t/hm²施用水平下,各有机肥处理间pH差异缩小,表明高施用量条件下,各类型有机肥碱性物质的总体输入量趋于一致,从而使其对土壤酸性中和能力接近。余顺平等^[18]研究发现,添加生物有机肥能显著提高土壤中养分的含量。与单施化肥相比,有机肥的施用显著改善了土壤肥力,增加了土壤中的全氮、全磷和有机质含量。张毅等^[19]研究表明,牛粪与化肥的施用能够提高苹果园土壤有机碳含量。本研究结果表明,与完全不施肥的阴性对照组相比,有机肥与化肥配施能够显著提高土壤有机碳含量,验证了前人的研究结论。土壤有机碳含量的增加可能是因为粪肥直接为土壤提供丰富的有机质和碳源,促进了微生物活动,进而加速有机质转化为稳定的腐殖质,同时有机质还能改善土壤结构,促进团聚体形成,从而通过减少分解流失来增加土壤中的有机碳储量^[15]。不同有机肥类型和施肥浓度对土壤有机碳含量的影响差异显著,羊粪处理组表现最优。这可能与羊粪中木质素含量较高,更易形成稳定腐殖质有关。而鸡粪和猪粪虽然富含易分解碳源,能在短期内迅速提升微生物活性,但因矿化速率快,对长期碳库固持的贡献较低。施肥浓度升高则通过增加有机质输入量,显著正向增强了土壤碳库。本研究结果表明,单施化肥组土壤全氮含量显著下降,可能是化肥中的氮素大多以易溶性形式存在,这类形态容易通过硝化作用生成硝酸盐,并在降雨或挥发过程中发生淋洗和气体损失。而化肥配施有机肥显著提升土壤全氮含量,尤其是化肥+猪粪、化肥+鸡粪和化肥+牛粪等高施用量组,表明有机肥在氮素保持和补充方面发挥了积极作用。这主要归因于有机肥中富含有机氮和稳定的有机质,其在微生物作用下缓慢释放氮素,同时改善土壤结构和水分保持性,降低氮素流失速率^[20]。其中,猪粪和鸡粪氮含量较高,C/N比较适中,促进微生物矿化有机氮并减少流失,有效补充土壤氮库;羊粪和牛粪因C/N比较高,前期可能固持氮素,但长期仍具有缓释补充功能。此外,施肥浓度升高显著提升土壤全氮含量,表明增加有机肥施用量能有效扩大土壤氮库储量。二者交互作用不显著,说明不同类型有机肥在不同施用浓度下对氮素增量的响应趋势基本一致。由此可见,以猪粪作为有机碳和氮源与化肥协同施用最能恢复火烧迹地土壤氮库,鸡粪次之,而单施化肥不仅无法改善,反而会加剧氮素流失。磷作为植物生长的重要元素,其有效性往往受到土壤酸碱度、微生物活性以及磷固定效应的共同影响^[21]。本研究中,尽管单施化肥在调节pH和氮素含量方面存在不利影响,但化肥的施用直接向土壤输入大量速效性磷源,表现出较强的磷素补给能力。而有机肥不仅含有一定量的磷,其丰富的有机质还能改善土壤结构,促进磷的固定和累积,这两种肥料都为土壤提供了额外的磷源,使得土壤全磷含量显著上升^[22]。双因素方差分析结果表明,施肥浓度对全磷含量具有显著主效应($P<0.05$),说明土壤中磷含量随施用量的增加显著升高,但肥料类型主效应及其与施肥浓度的交互作用均不显著,这说明全磷含量的增加主要取决于磷肥总量,而不是肥料类型和施肥浓度间的协同效应。

土壤团聚体的粒径分布和稳定性是重要的土壤健康指标,因为它们对环境变化具有较高敏感性,并直接影响土壤的水分渗透性、持水能力及侵蚀性^[23]。有研究表明,秸秆还田或施用有机肥料可显著提高土壤大团聚体的比例及土壤团聚体的稳定性^[24]。Chakraborty等^[25]在长期施用肥料研究中发现,相比未施肥的对照组,施肥处理显著提高了土壤团聚体的平均重量直径、孔隙度以及有机碳含量。本研究结果表明,不同肥料类型及浓度对土壤团聚体结构的改善效应存在差异,其中高浓度羊粪组合表现最优。这一趋势可能归因于羊粪中较高的木质纤维素,为大团聚体的稳定骨架提供了持久性基质,同时真菌菌丝的胶结作用进一步增强了团聚体的稳定性。相比之下,猪粪和鸡粪中富含易分解的蛋白质与多糖,更易被微生物快速利用,促进短期内中小粒径团聚体的形成与胶结,形成以微生物胞外多糖、腐殖质和无机胶结剂为核心的中小团聚体结构。此外,低浓度牛粪处理对土壤0.25~1.00 mm 粒级团聚体有一定促进作用,可能与其有机质分解缓慢、胶结剂释放持续时间较长有关,有利于维持中粒径团聚体的稳定性。各处理均能显著降低小粒径团聚体比例,并提升水稳定性团聚体含量,说明有机肥施用能有效促进团聚体小颗粒向大颗粒结构转化,改善团聚体结构,进而增强土壤的抗侵蚀能力与水分保持性能^[26]。双因素方差分析结果显示,肥料类型、施肥浓度及二者交互作用对粒级结构指标效应均不显著,说明在本试验条件下,团聚体结构改善主要依赖于有机质输入总量,而肥料类型和施肥浓度的协同作用有限。

动物粪便作为一种有机肥料,富含碳基质和多种营养元素,能够有效促进土壤微生物的生长与繁殖,大多数研究结果表明,施用动物粪便有助于提高土壤微生物生物量^[27-28]。学者对水稻土壤的研究指出,与化肥相比,有机肥料的施用使微生物生物量碳的含量增加了约29%^[29]。本研究结果表明,化肥与鸡粪高浓度配施处理对土壤微生物生物量碳的促进作用最为显著。这一现象可能与鸡粪中富含易分解有机碳和氮素密切相关,能够迅速为土壤微生物提供充足的能源和营养,激发微生物生长和代谢活性,同时,其中的微量元素和生物活性物质也可以调节微生物群落结构,提高碳源的利用效率。相比之下,猪粪和羊粪虽有一定碳源补充作用,但主要优势体现在磷素含量和稳定碳源供应上,更有利于磷循环微生物及溶磷微生物的活性,进而促进微生物生物量磷的积累。双因素方差分析结果显示,微生物生物量碳在高浓度施肥条件下表现出显著的肥料类型与施肥浓度交互效应,施用高浓度鸡粪处理组的微生物生物量碳含量显著高于其他有机肥处理,表明有机质投入量对微生物碳库积累具有关键调控作用。而微生物生物量磷则呈现不同趋势,表现出肥料类型与施肥浓度的极显著交互效应,在120 t/hm²浓度下,化肥+羊粪处理对微生物生物量磷的提升效果最为显著,其原因可能在于羊粪中稳定的有机碳能长期维持微生物活性,促进真菌等溶磷微生物生长,同时释放的有机酸有助于促进土壤中磷的有效性提升。综上,鸡粪因其富含易分解的有机碳,可以快速提升土壤微生物活性进而使微生物生物量碳含量显著增加,猪粪依赖自身较高的磷含量提高微生物磷库,而羊粪则凭借稳定碳源持续支持溶磷微生物活性,三者的提升火烧迹地土壤微生物群落功能方面展现出不同机制的优势。

本研究通过各处理进行主成分赋值及熵权-TOPSIS排序。熵权法结果显示,微生物生物量磷和0.25~1.00 mm 团聚体的权重较大,而孔隙度和pH的权重相对较小。这一结果可能是由于微生物生物量磷作为土壤活性磷库的关键组分,对外源养分输入(有机肥)的响应极为敏感,其变化能快速反映土壤磷循环活性和微生物功能恢复状态^[30];此外,有机肥的添加通过提供胶结物质和促进微生物活动显著促进大团聚体形成,从而提升碳氮固存能力,使团聚体在综合评价中占据重要地位^[31],而孔隙度和pH在短期施肥处理下变化幅度有限,导致其权重较低。TOPSIS排序结果显示,化肥+鸡粪120 t/hm²组在各项指标上表现最优,综合排名第一。熵权法能够根据数据本身的信息熵来确定各指标的权重,减少人为赋权时的主观影响,而TOPSIS方法则通过计算各处理与正理想解和负理想解之间的距离,实现对综合效应的排序^[32]。这种基于PCA和熵权-TOPSIS的多指标综合评价方法,不仅提高了评价过程的客观性和准确性,还能全面反映各处理在土壤改良、微生物活性及团聚体结构

等多个方面的综合效益。通过剔除主观因素的干扰,该方法为多指标评价提供了一个科学、系统且量化的分析框架,可为今后类似研究和土壤管理实践提供有力的决策支持。

4 结论

通过系统分析不同施肥处理对土壤理化性质、团聚体结构及稳定性、微生物生物量的影响,揭示以下关键结论:(1)试验结果表明,相比于完全不施肥的阴性对照组,施肥处理可显著改善土壤理化性质(如孔隙度提高至143.50%)、团聚体稳定性(土壤平均重量直径增加近97%)及微生物生物量(微生物生物量碳增幅达133.78%、微生物生物量磷增幅近78%),可以补充土壤必要养分,加速火烧后土壤生态恢复。(2)与单施化肥相比,化肥与有机肥的配施不仅缓解了化肥酸化和氮素流失问题,还通过有机质输入和微生物活性提升更全面地促进了土壤健康,因此在火烧迹地生态修复中,化肥与有机肥配施在整体效果上明显优于单施化肥。(3)在配施方案中,高浓度(120 t/hm²)下的羊粪处理主要通过提高有机碳含量和团聚体稳定性改善土壤结构,猪粪处理则促进土壤全氮积累,而鸡粪处理凭借较高可溶性有机碳和速效性养分含量,显著提升了土壤微生物活性及碳库水平。其机制在于不同粪源的C/N与可溶性有机质构成对团聚体胶结、微生物代谢及物理结构改良的差异性影响,因此未来要对肥料配施组合和肥料强度进行进一步的研究,开发针对性的肥料剂型和施肥强度。(4)采用PCA-熵权-TOPSIS方法结果显示,化肥+鸡粪120 t/hm²组在各项指标上表现最优,综合排名第一。其优势主要源于对土壤孔隙度、pH、有机碳、全氮、大团聚体比例及微生物生物量碳含量的显著改善,优化了土壤理化环境,增强了团聚体胶结与结构稳定性,并激活微生物代谢过程,进而实现土壤理化性质与生物功能的协同恢复。

参考文献:

- [1] NEARY D G, RYAN K C, DEBANO L F. Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soil and water[R]. Ogden, UT: Department of Agriculture, 2005: 1-17.
- [2] SENANDE-RIVERA M, INSUA-COSTA D, MIGUEZ-MACHO G. Spatial and temporal expansion of global wildland fire activity in response to climate change[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1208.
- [3] 曾素平, 刘发林, 赵梅芳, 等. 火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 233-246.
- [4] 王琳涛, 王云琦, 王玉杰, 等. 火干扰对缙云山土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(3): 25-33.
- [5] 朱文舟, 王俊坚, 曾辉. 森林火灾对土壤及水体重金属浓度水平的潜在影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2641-2649.
- [6] 邵丽文, 刘思博, 常虹, 等. 不同生态修复措施对毛乌素沙化草地土壤碳的短期影响[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 640-646.
- [7] 张庆, 李元恒, 丁勇, 等. 退化草地生态修复: 理论、技术、设备与评价[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 663-672.
- [8] PRATS S A, WAGENBRENNER J W, MARTINS M A S, et al. Mid-term and scaling effects of forest residue mulching on post-fire runoff and soil erosion[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 1242-1254.
- [9] 孙燕佳, 李素英, 黄平, 等. 奶牛养殖废水与有机肥混施对土壤理化性质的效应[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(4): 440-448.
- [10] VARELA S A, GOBBI M E, LAOS F. Can biosolids compost improve, in the short term, native vegetation and soils fertility in burned *Nothofagus pumilio* forest in Patagonia, Argentina?[J]. Bosque, 2011, 32(3): 267-278.
- [11] LIN Y R, WATTS D B, TORBERT H A, et al. Double-crop wheat and soybean yield response to poultry litter application[J]. Crop Forage & Turfgrass Management, 2019, 5(1): 1-8.

- [12] ABDALLA K, SUN Y, ZAREBANADKOUKI M, et al. Long-term continuous farmyard manure application increases soil carbon when combined with mineral fertilizers due to lower priming effects[J]. *Geoderma*, 2022, 428: 116216.
- [13] 杨光, 李兆国, 石炳东. 兴安落叶松林火烧迹地土壤有效磷与土壤微生物生物量磷时空演变特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 5027-5037.
- [14] FREY S D, KNORR M, PARRENT J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 159-171.
- [15] 张沛祯, 罗娟, 姚宗路, 等. 改性秸秆生物炭与有机肥混施对黄土丘陵旱区土壤持水保肥的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6): 322-332.
- [16] HÖGBERG P, HÖGBERG M N, GÖTTLICHER S G, et al. High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil microorganisms[J]. *New Phytologist*, 2008, 177(1): 220-228.
- [17] 梁尧, 苑亚茹, 韩晓增, 等. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1586-1594.
- [18] 余顺平, 熊于斌, 廖涛, 等. 连续化肥减量配施有机肥提升植烟土壤肥力质量的综合评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(1): 70-78.
- [19] 张毅, 刘颖, 程存刚, 等. 牛粪与化肥配施比例对苹果园土壤有机碳库和酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(20): 4107-4118.
- [20] 牛云梦, 魏文良, 王均艳, 等. 长期施用有机肥对土壤有机碳、全氮及腐殖质组分的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(7): 106-113.
- [21] 且天真, 武迪, 张德健, 等. 不同年限施用有机肥对土壤理化性质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(12): 135-141, 170.
- [22] 夏丽华, 刘彤, 孙宏勇, 等. 长期增施有机肥对咸水灌溉农田土壤水盐分布及有效磷含量的影响[J]. *华北农学报*, 2024, 39(S1): 150-158.
- [23] HAYNES R J, NAIDU R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123-137.
- [24] WU L, WANG J, XU H, et al. Soil organic carbon priming co-regulated by labile carbon input level and long-term fertilization history[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 166175.
- [25] CHAKRABORTY D, GARG R N, TOMAR R K, et al. Soil physical quality as influenced by long-term application of fertilizers and manure under maize-wheat system[J]. *Soil Science*, 2012, 175(3): 128-136.
- [26] 牟海萌, 孙丽芳, 王壮壮, 等. 施氮量和种植密度对两冬小麦品种抗倒性能和籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(15): 2863-2879.
- [27] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66: 165-180.
- [28] OZLU E, SANDHU S S, KUMAR S, et al. Soil health indicators impacted by long-term cattle manure and inorganic fertilizer application in a corn-soybean rotation of South Dakota[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 11776.
- [29] GEISSELER D, LINQUIST B A, LAZICKI P A. Effect of fertilization on soil microorganisms in paddy rice systems: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 452-460.
- [30] 陶冬雪, 高英志. 土壤解磷微生物促进植物磷素吸收策略研究进展[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4390-4399.
- [31] 韦自强, 郑磊, 贺怀宇, 等. 大兴安岭重度火烧迹地不同林龄落叶松人工林土壤团聚体养分特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 347-356.
- [32] 李俊杰, 李钢铁, 麻云霞, 等. 基于PCA-TOPSIS的沙地不同林龄榆树土壤养分评价[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(5): 17-23.

(责任编辑 张 庆)

Effects of Different Fertilization Measures on Soil Improvement in Burned Land

GUO Yuhang^{1,2}, WANG Jianzhu^{1,2}, ZHU Xiaolan¹, BAO Tao^{1,2}, TU Qiliang^{1,2}

(1. *College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;*

2. *International Joint Research Center for Ecological Protection and Governance in the Three Gorges Region, Yichang 443002, China*)

Abstract: Ecological restoration of forest fire-scarred land is a crucial step in maintaining ecosystem stability. However, due to the destruction of soil structure, nutrient loss, and imbalance of microbial communities caused by fire, it severely restricts the vegetation recovery and ecosystem reconstruction. The deterioration of soil physicochemical properties and the damage to the microbial environment have become the main obstacles to the ecological restoration of fire-scarred land. The study took the soil of the fire-scarred land in Yichang City as the object, and improved the soil of the fire-scarred land by adding external nutrients. The combined PCA-entropy weight-TOPSIS method was used for comprehensive evaluation, aiming to compare the rapid regulation effects of different fertilization strategies on key soil indicators and analyze the key limiting factors restricting its ecological restoration. The results show that different fertilization measures have varying effects on improving fire-scarred land soil. The combined application of chemical and organic fertilizers not only significantly alters soil physicochemical properties, such as increasing porosity (by 59.71% to 143.50%), improving the acid-base environment, and increasing soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus, but also enhances the soil aggregate structure and improves the microbial environment. Among them, the groups of chemical fertilizer+chicken manure 120 t/hm², chemical fertilizer+sheep manure 120 t/hm² and chemical fertilizer+pig manure 120 t/hm² have the most significant improvement effects on soil aggregate structure, organic carbon content and microbial biomass phosphorus index. The ranking results of soil improvement effects by PCA-entropy weight-TOPSIS method are as follows: chemical fertilizer+chicken manure 120 t/hm² group, chemical fertilizer+sheep manure 120 t/hm² group, chemical fertilizer+pig manure 120 t/hm² group, chemical fertilizer+sheep manure 60 t/hm² group, chemical fertilizer+pig manure 60 t/hm² group, chemical fertilizer+cow manure 120 t/hm² group, chemical fertilizer+chicken manure 60 t/hm² group, chemical fertilizer+cow manure 60 t/hm² group, chemical fertilizer only group, and no fertilization group. The results provide a theoretical basis for scientific fertilization in the ecological restoration of burned areas. The application of high-concentration chicken manure, sheep manure, and pig manure is an optimal measure for soil restoration in burned areas.

Key words: burned land; fertilization treatment; soil aggregate; soil microbial biomass; PCA-entropy weight-TOPSIS method