

黔中地区不同干扰对马尾松林土壤性质的影响

张 姣, 徐 明, 文春玉, 聂 坤, 张 健

(贵州大学生命科学学院真菌资源研究所, 贵阳 550025)

摘要: 森林土壤是森林植被生存和恢复的基础, 干扰不仅影响森林土壤生物与非生物的动态变化, 进而对森林生态系统的结构与功能产生重要影响。研究选取黔中地区 3 种干扰类型(清除凋落物、割脂和火灾)马尾松林为研究对象, 并分别在每种干扰样地周边设置未干扰马尾松林样地作为对照, 揭示不同干扰类型对马尾松林土壤性质的影响特征。结果表明: 不同土层间马尾松林土壤性质存在显著性差异($P < 0.05$), 主要体现在表层土壤(0—20 cm)养分含量显著高于下层土壤(20—40, 40—60 cm), 这表明马尾松林土壤养分具有“表聚”效应。不同干扰类型对马尾松林土壤性质存在一定显著性影响($P < 0.05$), 割脂干扰下, 马尾松林土壤的养分含量和脲酶活性升高, 全磷和有效磷含量无显著性差异; 清除凋落物干扰下, 马尾松林土壤 pH、有机碳、全氮含量和脲酶活性降低, 容重、全磷、有效氮和有效磷含量无显著差异, 有效钾含量和过氧化氢酶活性增加; 火灾干扰下, 马尾松林土壤的容重、有效钾含量和过氧化氢酶活性增加, 有机碳、全氮、全磷、有效氮含量和脲酶活性则表现为下降趋势, 有机碳和有效磷含量变化不显著。不同干扰类型下, 土壤酶活性与化学性质存在显著相关性, 表层土壤的显著相关性大于深层, 脲酶活性主要与全氮和有效氮含量存在显著相关关系, 过氧化氢酶活性与有机碳含量存在显著相关关系。不同干扰类型下, 土壤养分变异存在一定差异, pH 为弱变异性, 其余大部分土壤养分为中等变异性。综上, 不同干扰类型对马尾松林土壤性质有较大影响, 应对该地区马尾松林的利用与保护给与足够的重视, 对其合理管理和利用。

关键词: 马尾松林; 干扰; 土壤; 敏感性

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0135-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.019

Effects of Different Disturbances on the Soil Properties of *Pinus massoniana* Forest in Central Guizhou

ZHANG Jiao, XU Ming, WEN Chunyu, NIE Kun, ZHANG Jian

(Institute of Fungal Resource, College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Forest soil is the basis for the survival and restoration of forest vegetation. Disturbance not only affects the dynamic changes of forest soil organism and abiotic, but also has an important impact on the structure and function of forest ecosystem. The study selected three types of disturbance (clearing litter, resin tapping and fire) *Pinus massoniana* forests in central Guizhou as the research object, and set up undisturbed *P. massoniana* forest plots around each of the disturbance plots as the control, to reveal the influence characteristics of different disturbance types on soil properties of *P. massoniana* forest. The results showed that there were significant differences in the soil properties of the *P. massoniana* forest among different soil layers ($P < 0.05$), and the nutrient content of the top soil (0—20 cm) was significantly higher than that of the lower soil (20—40 cm and 40—60 cm), which indicated that the soil nutrients of the *P. massoniana* forest had “surface accumulation” effect. Different disturbance types had a significant impact on the soil properties of the *P. massoniana* forest ($P < 0.05$). Under the disturbance of resin tapping, soil nutrient content and urease activity increased, and there was no significant difference in contents of total phosphorus and available phosphorus. Under the disturbance of litter removal, the soil pH, organic carbon content, total nitrogen content and urease activity of the *P. massoniana* forest decreased, and there was no significant difference in the bulk density, total phosphorus content, available nitrogen content and available phosphorus content, while the available potassium content and catalase activity increased. Under fire

收稿日期: 2021-09-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(31960234, 31660150)

第一作者: 张姣(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事外生菌根真菌研究。E-mail: 17835064615@163.com

通信作者: 张健(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微生物生态学研究。E-mail: zhangjian12102@163.com

interference, the bulk density, available potassium content and catalase activity of the *P. massoniana* forest increased, while the contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and available nitrogen, as well as urease activity showed a downward trend, while the contents of organic carbon and available phosphorus did not unchanged significantly. Under different interference types, there was a significant correlation between soil enzyme activity and chemical properties. The significant correlation in surface soil was greater than that in deep soil. Urease activity was significantly correlated with contents of total nitrogen and available nitrogen, and catalase activity was significantly correlated with organic carbon content. Under different interference types, there were certain differences in soil nutrient variability. The soil pH was weak variability, and most of the remaining soil nutrients were medium variability. In summary, different types of disturbance had a great impact on the soil properties of the *P. massoniana* forest. Sufficient attention should be paid to the utilization and protection of the *P. massoniana* forest in this area, and rational management and utilization should be given.

Keywords: *Pinus massoniana* forest; disturbance; soil; sensitivity

植被和土壤是森林生态系统可持续性的重要组成部分,土壤为植物提供生长所需的养分和支持,植物通过根系作用和凋落物分解等改造土壤,二者相互作用,共同维持生态系统的稳定^[1]。干扰是自然界中常见的一种现象,不同类型和不同强度的干扰会加速或阻碍自然生态系统演替进程,影响森林生态系统的可持续发展^[2]。关于森林干扰类型主要包括:林火、采伐、修枝、砍伐林下灌木、扫除凋落物、放牧、采集果实、开矿、旅游和工业污染等,其人为干扰对森林的影响远大于自然干扰^[3]。土壤性质作为评价土壤的重要特征,影响土壤的健康和稳定,其变化在一定程度上反映了干扰对森林土壤产生的生态影响效应^[4]。

目前关于不同干扰类型对土壤理化性质的研究较多,但因干扰方式、干扰强度以及研究尺度等不同,研究结果仍存在较多不确定性。罗斯生等^[5]和刘冠宏等^[6]通过对油松和马尾松林土壤化学性质的影响研究表明,火灾后土壤的有机碳、全氮和有效氮显著下降,而容重、pH、全磷、有效磷和有效钾则显著增加;Awotoye 等^[7]研究发现,森林采伐干扰降低土壤 pH,土壤养分含量增加,但随着采伐年限的增加,土壤养分含量降低;张晓芹等^[8]研究发现,旅游干扰对森林土壤影响显著,随着干扰强度增加,土壤容重、pH 和全钾含量呈上升趋势,而土壤的含水量、有机质、全氮和全磷含量则显著下降,土壤全磷含量无显著变化。因此,探讨各区域森林干扰对土壤性质的影响仍有待加强,以期为区域森林可持续经营提供科学参考。

马尾松(*Pinus massoniana*)是南方植被恢复的先锋树种,也是整树利用最高的树种,具有适应性强、生长快、木材用途广、松脂产量高和易于成林等特点^[9-10]。由于人类干扰活动频繁,马尾松林受到多种自然或人为干扰。林火是森林生态系统一种常见的

干扰方式,影响森林生态系统的物种组成、结构和功能^[11],森林火灾的人为原因占 97% 以上,其中祭祀用火导致森林火灾的占比位列首位。马尾松是我国重要的采脂树种,我国南方马尾松采脂林分布较为广泛^[12]。凋落物分解是森林生态系统物质循环和能量流动的重要环节,但我国南方乡村聚落的居民对马尾松林下凋落物层有着长期采集与利用的习惯,而且近年来也有将森林凋落物清除后采集腐殖质层用作花木培植土;马尾松林凋落物移除作为一种常见干扰已受到大量关注。黔中地区作为贵州省的中心区域,马尾松林作为该区域一种广泛分布的森林植被,遭受到来自自然(大气沉降、病虫害、风害、冻害等)和人为(如旅游干扰、人为火灾、采伐、采脂和凋落物移除等)等多方面复杂且多样的森林干扰^[13]。目前,关于火烧对森林土壤理化性质的研究较多^[5-6,13-14],采脂和清除凋落物对土壤理化性质的研究较少,且针对区域内不同干扰方式对森林土壤影响的研究甚少。本文选取黔中地区 3 种干扰方式(采脂、清除凋落物和火灾)对马尾松林土壤理化性质的影响,以期为马尾松林干扰生态学理论和可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔中地区,均位于黔中腹地,地貌以山地和丘陵为主,均属于亚热带季风湿润型气候,冬无严寒,夏无酷热,年平均气温 15.0 ℃,年均降水量 1 100 mm,年均相对湿度 78%,无霜期 276 天,土壤以黄壤和石灰土为主。

1.2 样地设置

经过资料查阅和野外实地踏查,2020 年 10—11 月在孟关乡的谷立村和孟关林场分别选取火烧和清除凋落物干扰类型的马尾松纯林样地,在龙里林场选取割脂的马尾松纯林样地,分别在周边选取与 3 种干

扰类型立地条件相对一致、未干扰的马尾松纯林样地作为对照,每种干扰类型及其对照设置 3 个重复,共设置 18 个样地。其中,人为火灾马尾松林样地为 2020 年 3 月谷立村森林火灾迹地(过火面积为 0.97 hm²);孟关林场凋落物清除样地为 2019—2020 年采

收区域;龙里林场割脂马尾松林为 2017 年开始采脂,每年割脂长度为 20~30 cm。每块样地内设置 1 个 20 m×20 m 调查样方,分别记录经纬度、海拔、坡度、坡向等基本环境信息(表 1),马尾松林龄均为 20~35 年,平均胸径为 21.62 cm,平均高为 17.13 m。

表 1 样地基本信息

干扰类型	样地	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	H—L/H—R/H—F/cm
清除凋落物	L—1	106°44′36.85″E,26°22′54.44″N	1126	18	北偏西 49°	3
	L—2	106°44′34.80″E,26°22′51.73″N	1132	24	北偏西 50°	3
	L—3	106°44′47.29″E,26°22′59.15″N	1184	23	北偏西 62°	3
未清除凋落物	NL—1	106°44′46.15″E,26°23′12.55″N	1161	13	北偏西 69°	0
	NL—2	106°44′50.12″E,26°23′13.55″N	1167	15	南偏西 81°	0
	NL—3	106°46′51.34″E,26°23′13.52″N	1183	18	南偏西 51°	0
割脂	R—1	106°59′06.90″E,26°28′19.46″N	1172	10	北偏东 12°	64.33
	R—2	106°59′02.46″E,26°28′18.00″N	1146	16	北偏西 51°	87.76
	R—3	106°59′08.01″E,26°28′19.12″N	1168	19	北偏东 27°	63.23
未割脂	NR—1	106°58′48.44″E,26°28′28.17″N	1082	10	南偏东 74°	0
	NR—2	106°58′46.69″E,26°28′31.18″N	1099	9	南偏东 21°	0
	NR—3	106°56′29.97″E,26°27′10.69″N	1163	12	南偏西 17°	0
火烧	F—1	106°45′55.74″E,26°27′54.07″N	1176	10	北偏东 07°	236
	F—2	106°45′55.33″E,26°27′52.86″N	1175	21	南偏东 75°	204
	F—3	106°45′59.52″E,26°27′56.76″N	1171	15	南偏西 83°	218
未火烧	NF—1	106°46′02.70″E,26°27′52.71″N	1135	16	南偏东 57°	0
	NF—2	106°46′02.26″E,26°27′53.23″N	1137	17	北偏东 52°	0
	NF—3	106°46′06.49″E,26°27′53.64″N	1136	20	南偏东 72°	0

注:H—L 表示清除凋落物厚度;H—R 表示割脂高度;H—F 表示火烧高度。

1.3 样品采集

调查样方内随机采集表层(0—20 cm)环刀样品 3 个;用土钻分别采集 0—20,20—40,40—60 cm 土层的 6 点混合土样,各层土壤样品分别装入塑封袋,放入保鲜箱带回实验室。每个土壤样品经去掉石头等杂质、全部过 2 mm 孔径的土筛后,室内自然风干,再分别过 1,0.25 mm 土筛后用于土壤性质指标的测定。

1.4 土壤理化指标分析

土壤电导率(EC, mS/cm)采用 Moisture Meter HH2 便携仪器(WET—2, Delta—T Devices Ltd.)测定;土壤容重(soil bulk density, SBD)采用环刀法测定;土壤 pH 采用玻璃电极法(水土重量比为 2.5 : 1)测定;土壤有机质(soil organic matter, SOM)采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;全氮(sotal nitrogen, TN)采用半微量凯氏定氮法测定;全磷(total phosphorus, TP)采用浓硫酸—高氯酸消煮法测定;有效氮(available nitrogen, AN)采用碱解扩散法测定;有效磷(available phosphorus, AP)采用盐酸—硫酸浸提液比色法测定;有效钾(available potassium, AK)采用醋酸铵—火焰分光光度计法测定;土壤脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[15]。

1.5 数据统计

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行初步整理,采

用 SPSS 25 软件中配对样本 *T* 检验进行数据分析,显著水平设置为 *P* < 0.05;采用 Two-way ANOVA 判断干扰类型、土层对土壤性质是否具有交互影响;采用皮尔逊方法(Pearson)对土壤酶活性与化学性质进行相关性分析。用变异系数(CV)的大小衡量土壤性质指标的变异性,变异系数(CV) = 标准偏差/平均值 × 100%。CV ≤ 10% 为弱变异性;10% < CV < 100% 为中等变异性;CV ≥ 100% 为强变异性^[16]。

2 结果与分析

2.1 不同干扰类型对土壤电导率和容重的影响

土壤电导率对不同类型的土壤响应存在一定差异,可用其表征土壤盐分、质地、养分含量和 pH 等指标^[17];土壤容重是表征土壤质量的重要参数之一,受多种自然因素的影响(质地、结构和干扰等)。从表 2 可以看出,清除凋落物和割脂对土壤电导率均存在显著影响,割脂和火烧使马尾松林土壤容重增加,3 种干扰类型对容重变化均无显著性影响。

2.2 不同干扰类型和土层对土壤性质的影响

由表 3 可知,干扰类型显著影响土壤 pH、有效氮、有效磷和有效钾,而土层显著影响除有效磷以外的土壤性质,干扰类型 × 土层的交互作用显著影响土壤 pH、有效钾含量、脲酶活性和过氧化氢酶活性。

表 2 干扰后不同干扰类型下马尾松林土壤电导率和容重的变化特征

样地	电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
清除凋落物 L	$0.15 \pm 0.01\text{a}$	$1.03 \pm 0.04\text{a}$
未清除凋落物 NL	$0.02 \pm 0.00\text{b}$	$1.08 \pm 0.09\text{a}$
割脂 R	$0.49 \pm 0.04\text{a}$	$1.33 \pm 0.04\text{a}$
未割脂 NR	$0.20 \pm 0.02\text{b}$	$1.16 \pm 0.04\text{a}$
火烧 F	$0.17 \pm 0.03\text{a}$	$1.01 \pm 0.07\text{a}$
未火烧 NF	$0.15 \pm 0.02\text{a}$	$0.96 \pm 0.03\text{a}$

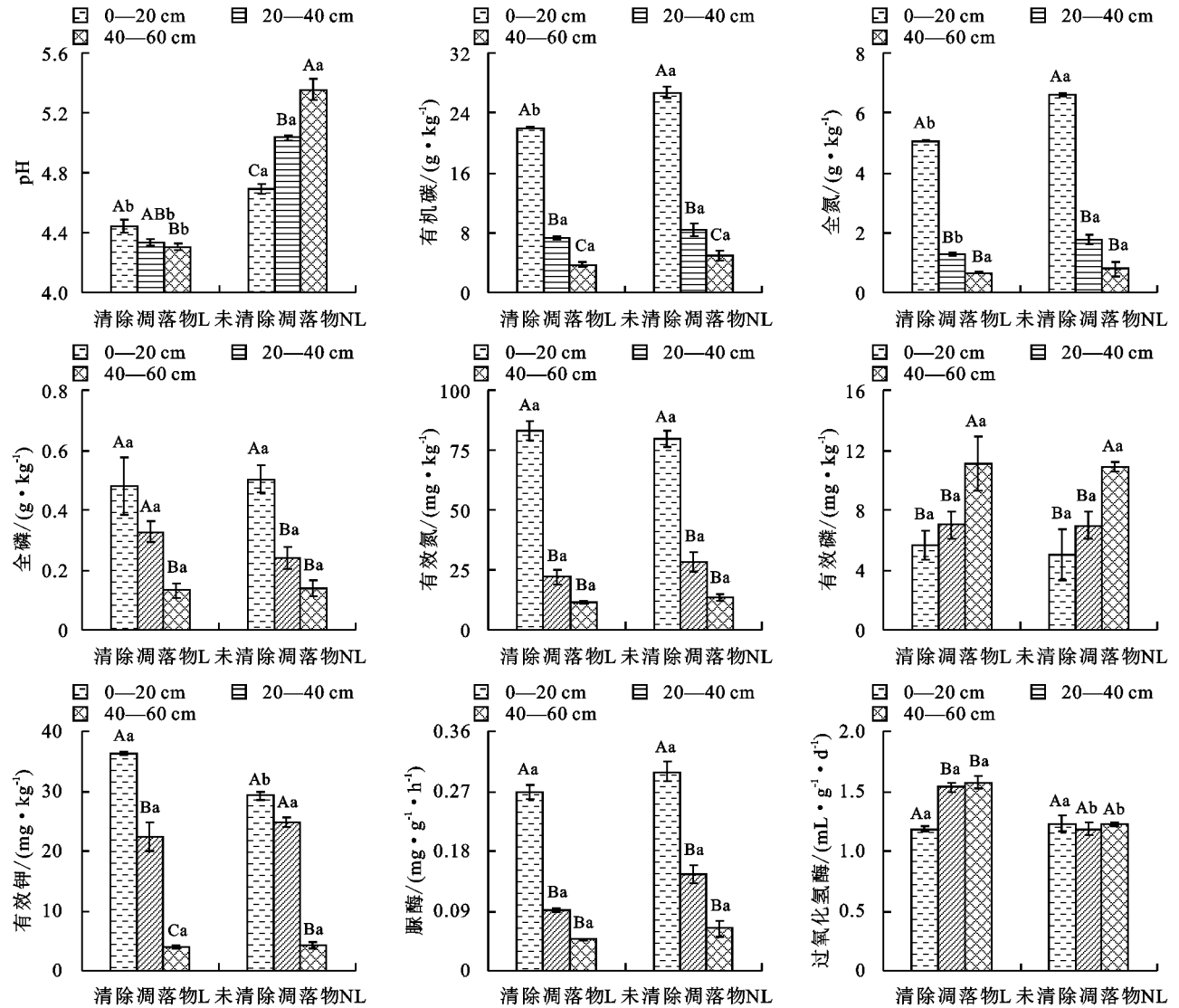
注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示干扰与对照之间差异显著($P<0.05$)。

2.2.1 清除凋落物对马尾松林土壤理化性质与生物指标的影响 从图 1 可以看出,清除凋落物与对照的马尾松林样地土壤有机碳、全氮、全磷、有效氮、有效

钾和脲酶活性均表现为随着土层深度增加而降低的趋势,有效磷含量随土层深度增加而增加。清除凋落物马尾松林土壤有机碳和有效钾在不同土层存在显著性差异($P<0.05$);全磷和有效磷含量在 0—20, 20—40 cm 土层无显著性差异,但其与 40—60 cm 土层间存在显著性差异;其余土壤指标在 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层间存在显著性差异($P<0.05$),但 20—40 cm 与 40—60 cm 土层间差异不显著。与未清除凋落物相比,清除凋落物各土层的土壤 pH、有机碳、全氮和脲酶活性均下降,且在 0—20 cm 土层存在显著性差异($P<0.05$);土壤全磷、有效氮和有效磷含量均无显著性差异;土壤有效钾和过氧化氢酶活性则表现为增加,且 0—20 cm 土层有显著性差异($P<0.05$)。

表 3 干扰类型和土层对土壤性质影响方差分析(P 值)

项目	pH	有机碳	全氮	全磷	有效氮	有效磷	有效钾	脲酶	过氧化氢酶
干扰类型	<0.001	0.888	0.524	0.132	0.001	<0.001	<0.001	0.011	0.572
土层	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.306	<0.001	<0.001	<0.001
干扰类型×土层	<0.001	0.728	0.849	0.911	0.135	0.136	0.001	<0.001	0.005



注:图中不同小写字母表示同一土层干扰与未干扰之间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示干扰或未干扰在不同土层差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 清除凋落物干扰后土壤性质的变化特征

2.2.2 割脂对马尾松林土壤理化性质与生物指标的影响 从图2可以看出,割脂与未割脂马尾松林土壤pH、全氮、有效氮和脲酶活性均表现出随着土层深度的增加而降低,过氧化氢酶活性随土层深度增加呈升高趋势,在0—20 cm与20—40,40—60 cm土层间存在显著性差异,在20—40 cm与

40—60 cm土层间无显著性差异,有效钾在3个土层之间存在显著性差异,有效磷随着土层深度的增加无明显规律性。

马尾松林割脂与未割脂相比,pH、有机碳、全氮、全磷、有效氮、有效钾和脲酶活性均增加,过氧化氢酶活性降低,有效磷无明显变化。

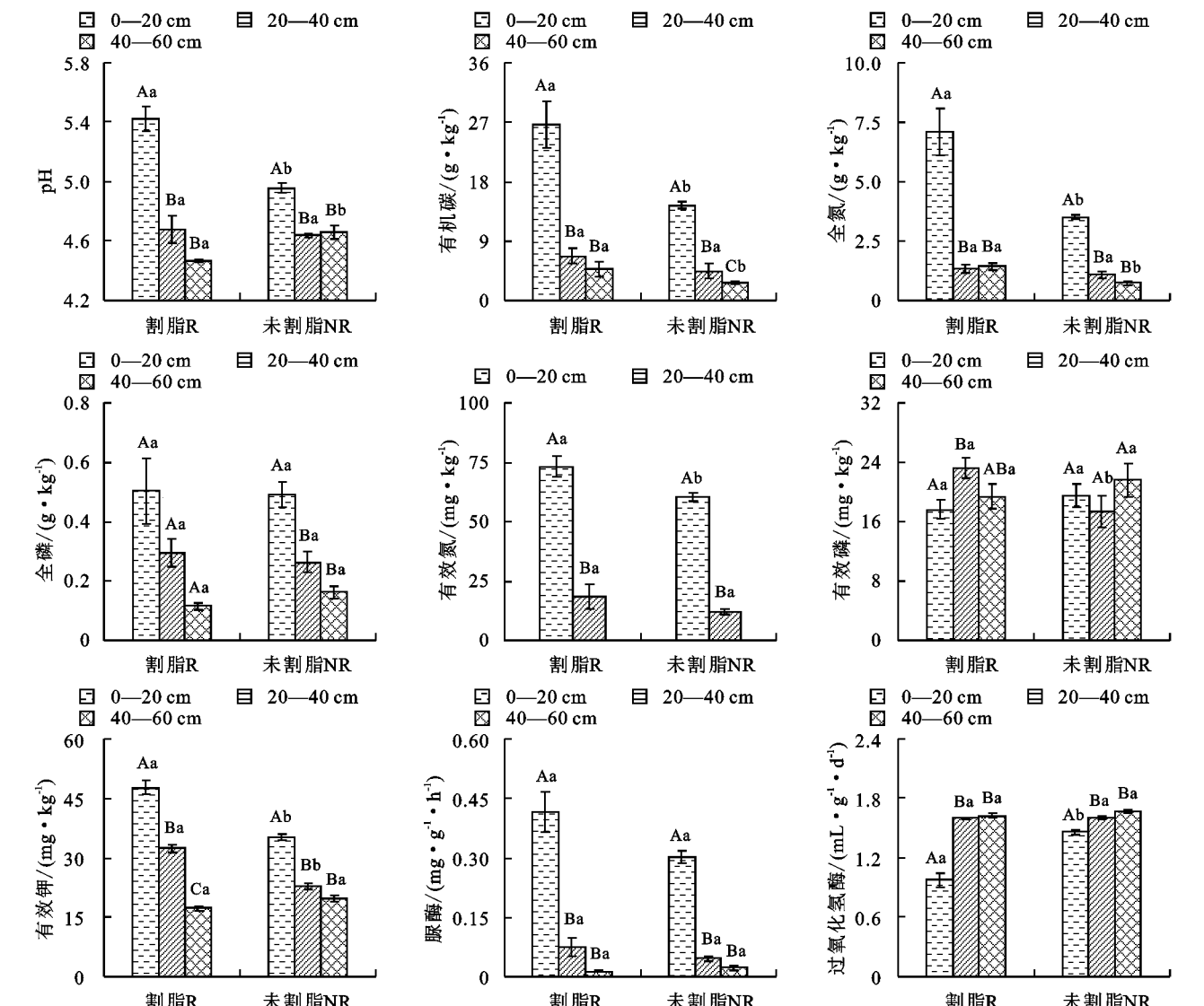


图2 割脂干扰后土壤性质的变化特征

2.2.3 火灾对马尾松林土壤理化性质与生物指标的影响 林火干扰后对马尾松林土壤指标产生一定的影响(图3),马尾松林土壤养分含量和脲酶活性均随土层加深呈降低趋势,过氧化氢酶活性随土层的加深呈升高趋势。林火干扰后马尾松林各土层土壤有机碳、全氮和全磷均显著降低,有效钾显著增加,pH和有效氮在0—20 cm与20—40 cm土层存在显著性差异($P<0.05$),而20—40 cm与40—60 cm土层间则差异不显著,林火干扰与土层对马尾松林土壤有效磷影响无明显规律性,且未表现出显著性差异。林火干扰后,脲酶和过氧化氢酶活性均降低,且仅在0—20 cm与20—40 cm土层间存在显著性差

异($P<0.05$)。

2.3 不同干扰类型下土壤酶活性与土壤化学性质的相关性分析

通过对不同干扰类型下马尾松林土壤酶活性指标与土壤化学性质间进行相关性分析(表4)表明,总体上,不同干扰类型的马尾松林土壤脲酶活性和过氧化氢酶活性与土壤化学性质间的相关关系存在明显差异,且随土层深度增加相关性呈下降趋势。清除凋落物干扰下,脲酶活性与全氮呈显著相关关系,割脂干扰下,脲酶活性与全氮和有效氮呈极显著相关关系;3种干扰下过氧化氢酶活性均与有机碳和全氮呈显著相关关系。

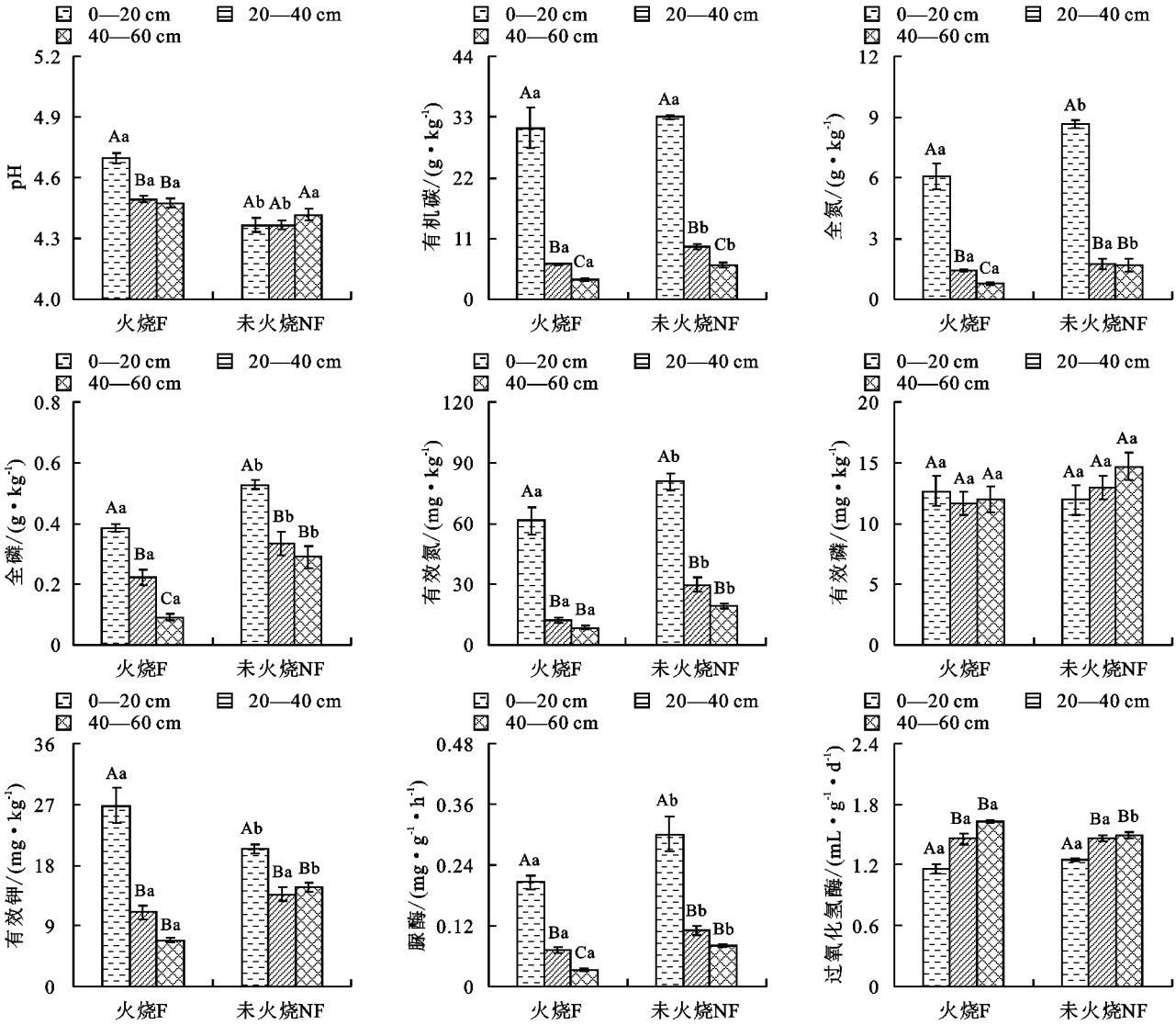


图 3 火烧干扰后土壤性质的变化特征

表 4 不同干扰类型土壤酶活性与化学性质的相关性分析

干扰类型	土层深度/cm	土壤酶	pH	有机碳	全氮	全磷	有效氮	有效磷	有效钾
清除凋落物	0—20	脲酶	0.199	0.803 *	0.842 *	−0.074	−0.304	−0.44	−0.535
		过氧化氢酶	0.382	−0.345	0.092	−0.938 **	0.545	0.266	−0.433
	20—40	脲酶	−0.343	−0.284	−0.746 *	−0.322	0.115	−0.520	0.023
		过氧化氢酶	0.621	−0.863 **	0.773 *	−0.773 *	−0.758	0.204	0.667
	40—60	脲酶	−0.137	−0.432	−0.181	−0.322	−0.693	−0.615	−0.377
		过氧化氢酶	−0.190	0.944 **	0.142	0.467	0.471	0.464	0.953 *
割脂	0—20	脲酶	0.868 **	0.879 **	0.937 **	0.066	0.871 **	−0.562	−0.433
		过氧化氢酶	−0.920 **	−0.964 **	−0.899 **	−0.601	−0.890 **	0.882 **	0.825 **
	20—40	脲酶	0.960 **	0.990 **	0.950 **	0.847 *	0.995 **	0.618	−0.579
		过氧化氢酶	−0.708	−0.681	−0.549	−0.349	−0.803	−0.791	0.469
	40—60	脲酶	−0.189	1.000 **	−0.351	0.756	—	−0.474	0.500
		过氧化氢酶	0.645	0.629	0.507	0.984	—	0.387	−0.359
火烧	0—20	脲酶	0.508	0.423	0.504	−0.544	0.678 *	0.693 *	0.880 **
		过氧化氢酶	0.086	−0.875 **	−0.906 **	0.554	−0.874 **	−0.649	−0.953 **
	20—40	脲酶	0.632	−0.438	−0.200	0.429	−0.051	−0.522	−0.019
		过氧化氢酶	0.019	−0.712 *	−0.917 **	−0.534	−0.703 *	−0.599	−0.893 **
	40—60	脲酶	0.183	0.074	−0.061	−0.34	0.048	0.351	−0.084
		过氧化氢酶	−0.276	−0.131	0.003	0.368	−0.064	−0.418	0.031

注：* 表示显著相关($P<0.05$)；** 表示极显著相关($P<0.01$)。

2.4 不同干扰类型下土壤质量指标变异性

由表 5 可知,3 种干扰类型下马尾松林土壤的 pH 均表现为弱变异性,大部分土壤养分含量表现为中等变异。

总体上,除凋落物马尾松林土壤有效磷、全磷、全

氮的变异性最大;割脂马尾松林土壤全磷、全氮、有机碳的变异性最大;火烧马尾松林土壤有效氮、全氮、有机碳的变异性最大。3 种干扰马尾松林土壤酶活性指标的变异程度表现为脲酶>过氧化氢酶,其中脲酶酶活性属中等变异。

表 5 不同干扰类型下马尾松林土壤质量变异系数

单位: %

干扰类型	土层深度/cm	pH	有机碳	全氮	全磷	有效氮	有效磷	有效钾	脲酶	过氧化氢酶
L	0—20	2.52	15.63	19.67	34.50	8.78	29.61	8.07	9.92	3.81
	20—40	0.93	6.30	22.08	26.21	23.27	32.81	12.73	7.80	4.35
	40—60	0.24	16.63	12.55	39.29	25.45	37.41	23.41	10.08	5.95
NL	0—20	1.67	4.57	9.47	46.01	6.71	41.17	3.52	11.19	13.25
	20—40	0.64	24.40	22.20	37.83	26.89	32.21	8.06	20.99	11.05
	40—60	3.08	34.88	39.21	15.23	32.56	6.10	5.00	36.84	2.70
R	0—20	4.42	39.40	45.87	43.82	17.14	20.65	10.75	36.61	11.27
	20—40	4.95	30.81	25.12	32.53	21.25	13.89	6.08	49.81	1.82
	40—60	0.34	0.28	14.84	15.95	—	14.85	6.66	25.33	1.93
NR	0—20	1.87	9.76	7.78	14.33	6.90	23.33	7.08	16.79	4.11
	20—40	0.76	26.88	35.00	27.73	27.09	36.73	10.93	41.36	2.97
	40—60	2.89	13.12	28.19	38.90	—	30.51	20.50	35.45	2.53
F	0—20	1.80	36.26	31.61	7.90	35.37	28.51	28.67	18.11	12.56
	20—40	1.13	8.43	14.85	35.44	28.65	24.75	28.75	28.03	10.62
	40—60	1.41	19.32	17.67	34.59	20.86	27.27	15.3	28.14	2.53
NF	0—20	2.48	3.65	7.20	9.31	15.12	30.29	9.20	34.50	3.42
	20—40	1.59	13.45	35.38	28.31	29.12	22.61	21.20	23.64	5.29
	40—60	1.85	23.58	36.77	17.74	30.64	23.28	13.68	15.12	6.29

3 讨论

森林土壤质量是由气候条件、母质类型、森林类型以及人为活动干扰等多种因素共同决定的,人为干扰会改变光照、温度、水分和养分等森林环境条件,引起森林土壤理化性质的改变^[18]。本研究中,不同土层间马尾松林土壤性质存在显著性差异($P<0.05$),主要体现在表层土壤(0—20 cm)养分含量显著高于下层土壤(20—40,40—60 cm),这与已有研究^[19]结果一致,说明土壤养分具有“表聚”效应。割脂干扰后马尾松林土壤 pH 呈升高趋势,土壤养分含量均增加,且存在一定显著性差异,可能是因为割脂破坏了马尾松树皮形成层,影响木质部和韧皮部对水分和养分的运输,使土壤中养分积累。已有研究^[12]表明,采脂会破坏割脂部位形成层,影响木质部和韧皮部的功能,减少林木对土壤养分的吸收与利用,抑制林木生长。清除凋落物后红松林土壤 pH 和有机碳、全氮和全磷含量降低,但无显著性差异,而且土壤养分含量变化与清除凋落物的时间和年限有关。本研究中清除凋落物后 pH、有机碳和全氮含量降低,全磷、有效氮和有效磷含量无显著性降低,有效钾含量增加,这与已有研究^[20]结果基本一致,土壤大部分养分来源于林下凋落物分解,清除凋落物后土壤缺少来自枯枝

落叶分解产生的养分,使土壤养分含量降低,但同时清除凋落物时也对林下部分草本和植被造成伤害,使林下植被对养分需求减少,可能是造成部分养分指标无显著变化或者降低的原因。通过烧死树木占比、乔木熏黑高度以及林下灌木和凋落物烧毁程度,判定本研究中的马尾松林火烧强度应为中度火烧^[21];火灾干扰后马尾松林土壤 pH 和速效钾含量增加,有机碳、全氮、全磷和有效氮含量显著降低,因为火烧使土壤高温持续时间长,部分养分经燃烧后从有机态转变为无机态而挥发;其次,烧毁迹地植被更新需要大量养分,使得土壤养分含量降低^[6,22]。但也有研究^[14]结果表明,火烧后土壤养分含量增加,因为火烧加速林下凋落物和植被的分解,使表层土壤的有机质和其他元素含量积累。3 种干扰类型下马尾松林土壤全磷含量随着土层深度的增加而降低,但无显著性差异;土壤有效磷含量在不同土层无明显差异和规律性,因为磷元素作为一种深积性的矿质元素,以一种较稳定的形式存在于土壤中,迁移扩散能力差,所以在土层分布上较均匀且无显著性差异^[23-24]。已有研究^[25]表明,磷元素易与铁、铝等氢氧化合物及其离子形成不溶性的磷化合物沉淀,土壤全磷含量低于 0.6 g/kg,土壤出现磷元素供应不足现象,贵州属于

典型喀斯特区域,该地区磷元素含量也是限制土壤微生物的主要因素之一,本研究中受干扰后的马尾松林与对照样地土壤全磷含量均低于 0.6 g/kg,表明该地区缺磷严重。

土壤中各因子有着复杂的相互作用,其中大多有土壤酶的参与,酶活性与土壤氮素、pH 直接相关,土壤酶在土壤修复过程中又扮演着重要的角色^[26]。有研究^[27]表明,森林土壤中过氧化氢酶的酶活性随着土层深度的增加而增高,脲酶活性随着土层深度的增加而降低,与本研究结果一致。本研究通过对土壤酶活性与化学性质的相关性分析可知,不同土层土壤酶活性与化学性质的相关性存在差异,土壤表层酶活性与化学性质的相关性强于深层,因为土壤微生物大都生活在土壤表层,且酶活性的强度与土壤微生物数量有关,研究结果符合自然规律。已有研究^[28]表明,脲酶是一种含镍元素的寡聚酶,具有很高的专一性,能水解土壤中的氮素,且脲酶活性变化与全氮和有效氮的变化趋势一致,因此,不同干扰类型下脲酶活性主要与全氮和有机氮存在显著相关关系。过氧化氢酶是土壤中最常见的酶,其作用是降解土壤中对生长的植株有危害的过氧化氢,过氧化氢酶活性均与有机碳含量具有显著相关关系,表明酶活性与马尾松林土壤养分含量的转化关系密切^[29]。

土壤质量指标的变异性作为土壤物理、化学和生物属性的综合体现。有研究^[30]表明,马尾松林土壤养分含量均存在中等变异,有机碳、全氮、全磷有效磷和碱解氮的变异系数较高,本研究中不同干扰类型下马尾松林 pH 变异系数均小于 10%,为弱变异性,大部分土壤养分含量为中等变异。

4 结论

不同干扰类型马尾松林土壤性质存在着显著变化。不同土层间马尾松林土壤性质存在显著性差异($P < 0.05$),主要体现在表层土壤(0—20 cm)养分含量显著高于下层土壤(20—40, 40—60 cm),表明土壤化学性质具有“表聚”效应。总体上,割脂干扰后,马尾松林土壤性质呈现增加趋势;清除凋落物马尾松林土壤 pH、有机碳和全氮含量显著降低,全磷、有效氮和有效磷含量无显著差异;火烧干扰后,马尾松林土壤养分含量除有效钾外均降低,有效磷含量在不同土层和不同干扰后无显著性差异。土壤脲酶活性随土层深度增加呈降低趋势,过氧化氢酶活性随土层深度增加而升高,其显著性差异与土壤化学性质一致。不同干扰类型土壤酶活性与化学性质的相关性存在差异,土壤表层酶活性与化学性质的相关性大于深

层,3 种干扰类型下马尾松林脲酶活性强度主要与全氮和有效氮存在显著相关关系,过氧化氢酶活性主要与有机碳和全氮含量存在显著相关关系。不同干扰类型下马尾松林 pH 变异系数均小于 10%,为弱变异性,其余土壤养分含量普遍为中等变异。

参考文献:

- [1] 赵一娉,曹扬,陈云明,等.黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征[J].生态学报,2017,37(16):5451-5460.
- [2] Kassi N' Dja J K, Decocq G. Successional patterns of plant species and community diversity in a semi-deciduous tropical forest under shifting cultivation[J]. Journal of Vegetation Science, 2008, 19(6): 809-820.
- [3] 陈利顶,傅伯杰.干扰的类型、特征及其生态学意义[J].生态学报,2000,20(4):581-586.
- [4] San-José J, Montes R, Buendia C, et al. Response of terrestrial-aquatic palm ecotone (morichal) to anthropogenic disturbance in the Orinoco Lowlands [J]. Folia Geobotanica, 2012, 47(2): 153-178.
- [5] 罗斯生,罗碧珍,魏书精,等.森林火灾对马尾松次生林土壤理化性质的影响[J].生态环境学报,2020,29(11): 2141-2152.
- [6] 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.
- [7] Awotoye O O, Ekanade O, Airouhudson O O. Degradation of the soil physicochemical properties resulting from continuous logging of *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* plantations[J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(11): 1317-1324.
- [8] 张晓芹,孙磊,张强.旅游干扰对济南千佛山风景区土壤部分生态因子的影响[J].水土保持学报,2015,29(4): 332-336.
- [9] 蔡秀珠.人为干扰强度对马尾松人工林生物量及其分配的影响[J].中南林学院学报,2006,26(2):51-54.
- [10] 周正贤.中国马尾松[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [11] Johnstone J F, Hollingsworth T N, Iii F, et al. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest[J]. Global Change Biology, 2010, 16(4): 1281-1295.
- [12] 唐生森,韦理电,蒙春江,等.采脂对湿地松幼林生长的影响与效益分析[J].中南林业科技大学学报,2017,37(11):96-102.
- [13] 张喜,朱军,崔迎春,等.火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响[J].生态学报,2011,31(19): 5809-5817.
- [14] 刘发林,陈小伟,曾素平.不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):132-138.

[15] 鲁如坤.土壤农化化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999.

[16] 卜耀军,朱清科,包耀贤,等.陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J].水土保持学报,2014,28(3):153-157.

[17] 潘昭隆,刘会芳,赵帅翔,等.氮肥投入对不同土壤类型电导率变化的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(4):533-537.

[18] 王晓荣,胡文杰,庞宏东,等.湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J].中南林业科技大学学报,2020,40(11):156-166.

[19] 秦娟,唐心红,杨雪梅.马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J].生态环境学报,2013,22(4):598-604.

[20] 李常准,陈立新,段文标,等.凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):100-109.

[21] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等.林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(12):108-118.

[22] Xue L, Li Q, Chen H. Effects of a wildfire on selected physical, chemical and biochemical soil properties in a *Pinus massoniana* forest in south China[J]. Forests, 2014,5(12):2947-2966.

[23] 张荣,李婷婷,金锁,等.人为干扰对蒙顶山木荷次生林物种多样性及土壤理化性质的影响[J].浙江农林大学学报,2020,37(5):867-875.

[24] 朱海强,李艳红,张小萌.艾比湖湿地不同植物群落下土壤全磷空间变异[J].水土保持研究,2017,24(5):45-50.

[25] 吕倩,尹海锋,何朋俊,等.马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J].应用与环境生物学报,2018,24(3):500-507.

[26] Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Gil-Sotres F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(9):2146-2155.

[27] 张童,刘宇飞,隋心,等.土地利用方式对黑龙江西部地区土壤理化性质和酶活性的影响[J].农学学报,2021,11(5):33-41.

[28] Teng Y, Zhou Q. Response of soil enzymes, functional bacterial groups, and microbial communities exposed to sudan I-IV [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018,166(30):328-335.

[29] Yang L, Zhang Y, Li F. Soil enzyme activities and soil fertility dynamics[J]. Springer Netherlands, 2012, 892(11):143-156.

[30] 韩天一,张邦文,金苏蓉,等.江西红壤丘陵区主要森林类型土壤养分特征及评价[J].南方林业科学,2017,45(6):1-4,21.

(上接第 134 页)

[13] 邓妍,高志强,孙敏,等.夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J].应用生态学报,2014,25(1):132-138.

[14] 夏来坤,刘京宝,乔江方,等.不同底墒处理对夏玉米生长发育及产量的影响[J].中国农学通报,2014,30(27):66-71.

[15] 谢倩,陈冠英,陶洪斌,等.玉米播种期水分胁迫及补水对幼苗生长的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(6):16-24.

[16] 刘庚山,郭安红,安顺清,等.底墒对小麦根冠生长及土壤水分利用的影响[J].自然灾害学报,2003,12(3):149-154.

[17] 冯浩,刘匡,余坤,等.不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):192-202.

[18] 杜延军,李自珍,李凤民.半干旱黄土高原地区地膜覆盖和底墒对春小麦生长及产量的影响[J].西北植物学报,2004,24(3):404-411.

[19] 侯玉虹,尹光华,刘作新,等.土壤含水量对玉米出苗率及苗期生长的影响[J].安徽农学通报,2007,13(1):70-73.

[20] 陈培元,李英.限量灌溉对冬小麦抗旱增产和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,1992,10(1):48-52.

[21] Nielsen D C, Vigil M F, Benjamin J G. The variable response of dry land corn yield to soil water content at planting[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96: 330-336.

[22] 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].农业工程学报,2008,24(4):99-102.

[23] 薛俊武,任稳江,严昌荣,等.覆膜和垄作对黄土高原马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2014,35(1):74-79.

[24] 何立谦,张维宏,杜雄,等.土下覆膜与适宜灌水提高冬小麦水分利用率[J].农业工程学报,2016,32(增刊 1):94-104.

[25] 李世清,李东方,李凤民.半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(5):21-29.