



宋雪红,郑睿,武燕.西南喀斯特地区马尾松人工林土壤酶活性和 GRSP 含量特征分析[J].黑龙江农业科学,2024(11):51-58.

西南喀斯特地区马尾松人工林土壤酶活性和 GRSP 含量特征分析

宋雪红¹,郑睿¹,武燕^{1,2}

(1. 贵州师范学院 生物科学学院,贵州 贵阳 550018; 2. 贵州省高等学校林火生态与管理重点实验室,贵州 贵阳 550018)

摘要:为科学掌握西南喀斯特地区土壤环境特征,进而制定合理的人工林管理措施,促进喀斯特生态脆弱区土壤肥力恢复,选取贵州省遵义市凤冈县的马尾松人工林土壤为研究对象,分析中龄林、近熟林和成过熟林 3 种龄组及土层变化对土壤酶活性、球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)含量的影响,并分析二者与土壤物理性质及土壤养分的关系。结果表明,(1)龄组变化对土壤酶活性有显著影响,0~20 cm 土层 4 种土壤酶活性均随林龄的增加而升高,该土层马尾松人工林土壤蔗糖酶活性在中龄林、近熟林和成过熟林中分别为 8.85,10.42 和 11.98 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,磷酸酶活性分别为 0.54,0.57 和 0.69 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,过氧化氢酶活性分别为 2.58,3.15 和 4.40 $\text{mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,成过熟林土壤蔗糖酶活性显著高于中龄林,成过熟林土壤磷酸酶和过氧化氢酶活性均显著高于中龄林和近熟林。(2)土层变化对土壤磷酸酶和过氧化氢酶活性有显著影响,相同龄组下,中龄林和近熟林土壤磷酸酶活性表现为 20~40 cm 土层显著低于 0~20 cm 土层,分别下降 29.63%和 50.88%;成过熟林土壤过氧化氢酶活性表现为 20~40 cm 土层显著低于 0~20 cm 土层 25.00%。(3)0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量在 3 种龄组间大小关系均表现为中龄林>成过熟林>近熟林,其中 0~20 cm 土层中龄林 T-GRSP 含量为 3.56 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于近熟林 52.14%。(4)相关性分析结果表明,影响土壤酶活性的主要因素有容重、孔隙度、土壤有机碳、全氮、全磷和碱解氮含量,而 GRSP 含量主要受土壤物理性质的影响。综上,龄组变化对马尾松人工林土壤酶活性产生了显著影响,且土壤磷酸酶活性、过氧化氢酶活性和 GRSP 含量与土壤养分和理化性质存在显著的相关关系。说明在喀斯特生态脆弱区采用马尾松人工林造林模式可以通过调整马尾松龄组构成和相应的土壤养分含量变化来促进喀斯特退化地区土壤质量和肥力的恢复和提高。

关键词:喀斯特;马尾松人工林;土壤酶活性;球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)

我国西南地区具有典型的喀斯特地貌,土壤浅薄、养分含量贫瘠,石漠化问题严重,具有明显的生态脆弱性^[1],为改善该地区荒漠化情况,采用马尾松人工林造林模式,以提高喀斯特退化地区土壤质量和肥力水平。马尾松(*Pinus massoniana*)耐旱、耐瘠薄、喜光,是植被恢复的关键树种之一,在人工林中占有相当大的比重。贵州省有 1.9×10^6 hm^2 的马尾松资源,其中人工马尾松林占 69.63%,主要分布在遵义、铜仁、贵阳和黔南等 4 个州(市)^[2-3]。

土壤酶活性和土壤球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin Related Soil Protein, GRSP)含量是

反映土壤功能和质量的重要指标^[4-5]。土壤酶参与土壤各种生物化学过程以及物质循环^[6],其活性既可以反映土壤理化性质、微生物生物量和生物多样性的变化,也可以反映碳、氮、磷等养分循环情况和代谢水平^[7]。GRSP 是植物共生丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhizal, AM)真菌所分泌的一类含有金属离子的糖蛋白,分为易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)和难提取球囊霉素相关土壤蛋白(D-GRSP),二者含量之和即为总球囊霉素相关蛋白(T-GRSP)^[8]。同时 GRSP 还能够改善土壤的物理性质,进而增强土壤微生物的活性,提升土壤质量,还能够改善土壤的结构特

收稿日期:2024-04-15

基金项目:大学生创新创业训练计划项目(202314223025);贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]一般 282);贵州师范学院校级博士基金项目(2020BS026);贵州省教育厅平台项目([2022]051 号)。

第一作者:宋雪红(2001—),女,本科生,专业方向为生物科学。E-mail:1427703023@qq.com。

通信作者:武燕(1975—),女,博士,副教授,从事土壤生态学研究。E-mail:wuyan200081@163.com。

点,促进退化土壤恢复^[9]。

研究表明,土壤酶活性受植被恢复年限、土层深度及土壤养分等因子的影响^[10-11]。金章利等^[12]研究表明土壤酶活性随种植年限的增加而升高,而严绍裕^[13]研究表明随着种植年限的增加,土壤酶活性会降低;龙文靖等^[14]研究表明脲酶、蔗糖酶、蛋白酶、转化酶和碱性磷酸酶都表现出土壤上层高于下层的规律,而过氧化氢酶活性则随土层深度增加而增加;舒洪岚^[15]、于德良等^[16]和葛晓改等^[17]的研究表明土壤酶活性与土壤养分之间存在显著相关性。近年来,对土壤 GRSP 的研究主要集中在植被演替阶段、土壤理化性质、土壤酶活性和土层深度对 GRSP 的影响。邸涵悦等^[18]研究表明,0~30 cm 土层中,不同演替阶段的土壤 EE-GRSP 含量表现为乔灌混合林>乔木林>灌木林>草地>裸地;相关研究表明土壤 GRSP 含量与土壤理化性质存在显著相关性^[19-23];其中也有研究表明 T-GRSP、EE-GRSP 含量与土壤酶活性存在显著相关性^[22-24];沈育伊等^[22]还发现 T-GRSP 含量随着土层深度的增加呈下降趋势。

目前在喀斯特地区关于土壤 GRSP 含量与土壤理化性质关系研究鲜见报道,为此,本研究以贵州省遵义市凤冈县不同恢复年限马尾松人工林土壤为研究对象,在分析不同龄组马尾松人工林

土壤酶活性和 GRSP 含量差异的基础上,通过相关分析探究土壤酶活性和 GRSP 含量的关系及二者与土壤理化性质间的关系,以期揭示喀斯特山区马尾松人工林土壤酶活性和 GRSP 含量变化特征及内在驱动机制,为科学评价马尾松人工林土壤质量以及制定合理的人工林管理措施提供理论数据,以期指导喀斯特生态脆弱区土壤肥力恢复。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省遵义市凤冈县(27°32′N~28°21′N,107°31′E~107°56′E),年均气温 15.2℃,年均降水量 1 257.1 mm,为典型的亚热带湿润季风气候。该区地处乌江北岸,大娄山南部,区域内森林覆盖面积 17 773.33 hm²,森林覆盖率达 62%,常见树种有银杏、马尾松、杉木等。

1.2 方法

1.2.1 样地选取及样品采集 样地设置:在贵州省遵义市凤冈县,设置马尾松人工林样地 12 个(3 个中龄林,6 个近熟林,3 个成过熟林),每个样地面积 666.7 m²(25.82 m×25.82 m)。其中 11~20 年生的马尾松人工林为中龄林,21~30 年生的为近熟林,51 年以上的划为成过熟林。

表 1 不同龄组马尾松人工林样地理化性质

龄组	样地号	容重/ (g·cm ⁻³)	含水量/ %	孔隙度/ %	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (g·kg ⁻¹)
中龄林	1	0.87	62	67	8.86	0.66	0.34	69.33	4.95
	2	1.10	34	59	15.78	0.91	0.46	88.03	5.03
	3	1.28	19	52	11.36	0.29	0.18	100.91	3.60
近熟林	4	1.28	17	52	10.99	0.68	0.46	55.15	1.52
	5	1.29	24	51	24.51	1.59	0.28	189.98	2.91
	6	0.94	19	64	17.58	1.11	0.45	92.29	2.63
	7	1.20	31	55	11.43	0.52	0.20	81.51	2.34
	8	1.36	13	49	18.19	1.00	0.22	110.41	5.35
成过熟林	9	1.24	28	53	12.45	0.86	0.41	94.56	3.54
	10	1.33	25	50	9.47	0.68	0.31	64.70	2.53
	11	0.93	55	65	14.47	0.57	0.58	83.20	4.18
	12	0.90	30	66	26.09	1.41	0.28	180.27	6.29

土壤样品采集:在样地采用五点取样法选取 5 个样点,清除土壤表面纸屑、碎石、枯枝落叶等杂质,在 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层处用 100 cm³环刀取样,将 5 个样方同一土层的土壤混

匀,称量鲜重,装袋贴上标签带回实验室自然风干至恒重,采用四分法处理土样,粉碎后分别过 0.250 mm 和 0.149 mm 的筛,进行土壤理化性质、土壤酶活性和 GRSP 含量的测定。

1.2.2 测定项目及方法 土壤容重及孔隙度采用环刀法测^[25];土壤含水量用风干土进行计算;有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮含量采用半微量凯氏法测定;全磷含量采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法^[26]测定;蔗糖酶活性采用 3-5 二硝基水杨酸比色法(以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示蔗糖酶活性);脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定(以 24 h 后 1 g 土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示脲酶活性);磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法(以 1 h 后每 100 g 土壤中 P_2O_5 的毫克数表示磷酸酶活性);过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法(以 1 min 后 1 g 土壤的 $0.02\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高锰酸钾的毫升数表示过氧化氢酶活性)^[27];EE-GRSP 和 T-GRSP 含量采用考马斯亮蓝比色法^[28]测定;上述所有样品均需设置 3 个重复样品。

1.2.3 数据分析 试验数据采用 Excel 2019 进行整理;使用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析,明确不同龄组马尾松人工林土壤酶活性和 GRSP 含量的差异;通过独立样本 *T* 检验分析不同土层马尾松人工林土壤酶活性和 GRSP 含量差异;运用 Pearson's 相关分析法探究土壤酶活性与 GRSP 含量、土壤酶活性和 GRSP 含量与土壤理化性质的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同龄组马尾松人工林土壤酶活性的特征分析

2.1.1 蔗糖酶 由图 1A 可知,马尾松人工林土壤蔗糖酶活性变化范围为 $4.95\sim 11.98\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,相同土层不同龄组之间土壤蔗糖酶活性变化规律表现不一致。在 0~20 cm 土层,不同龄组土壤蔗糖酶活性的大小顺序为:成过熟林>近熟林>中龄林,成过熟林土壤蔗糖酶活性为 $11.98\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,显著高于中龄林 $[8.85\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}]$,增比为 35.37%,这一土层土壤蔗糖酶活性随龄组增加呈现逐渐上升的趋势,上升的幅度在 14.97%~35.37%之间;20~40 cm 土层中,中龄林、近熟林和成过熟林土壤蔗糖酶活性分别为 7.55,11.65 和 $4.95\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,其中近熟林土壤蔗糖酶活性较成过熟林显著增高 135.35%。另外,相同龄组下,3 种龄组马尾松人工林土壤蔗糖酶活性在 0~20 cm 和 20~40 cm

土层间均无显著差异。

2.1.2 脲酶 由图 1B 可知,马尾松人工林土壤脲酶活性变化范围为 $7.15\sim 12.89\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,随着人工林恢复年限的增加,0~20 cm 土层脲酶活性呈现逐渐上升的趋势,上升幅度在 31.29%~76.64%之间;在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中,马尾松人工林土壤脲酶活性在 3 种龄组间无显著差异。相同龄组下,马尾松人工林土壤脲酶活性在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层间也无显著性差异。

2.1.3 磷酸酶 由图 1C 可知,马尾松人工林土壤磷酸酶活性变化范围为 $0.28\sim 0.69\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,0~20 cm 和 20~40 cm 两个土层中不同龄组之间马尾松人工林土壤磷酸酶活性变化规律表现不一致。在 0~20 cm 土层中,土壤磷酸酶活性随马尾松人工林龄组增加呈逐渐上升的趋势,上升幅度为 5.56%~27.78%,3 种龄组中,成过熟林土壤磷酸酶活性最高,为 $0.69\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,较中龄林和近熟林分别显著高 27.78%和 21.05%;20~40 cm 土层中,土壤磷酸酶活性大小顺序表现为近熟林<成过熟林<中龄林,中龄林土壤磷酸酶活性较近熟林显著高 35.71%。相同龄组下,中龄林和近熟林土壤磷酸酶活性则表现为 20~40 cm 土层显著低于 0~20 cm 土层,分别下降 29.63%、50.88%。

2.1.4 过氧化氢酶 由图 1D 可知,马尾松人工林土壤过氧化氢酶活性变化范围为 $2.58\sim 4.40\text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,两个土层不同龄组之间马尾松人工林过氧化氢酶活性变化规律表现不同。0~20 cm 土层,3 种龄组马尾松人工林土壤过氧化氢酶活性具体表现为中龄林<近熟林<成过熟林,含量分别为 2.58,3.15 和 $4.40\text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,其中成过熟林土壤过氧化氢酶活性较中龄林和近熟林分别显著高 70.54%和 39.68%;近熟林较中龄林显著高 22.09%,土壤过氧化氢酶活性随龄组增加上升幅度在 22.09%~70.54%之间;在 20~40 cm 土层,3 种龄组马尾松人工林土壤过氧化氢酶活性在中龄林、近熟林和成过熟林中分别为 3.76,3.50 和 $3.30\text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,且无显著差异。相同龄组下,成过熟林土壤过氧化氢酶活性表现为 20~40 cm 土层显著低于 0~20 cm 土层 25.00%。

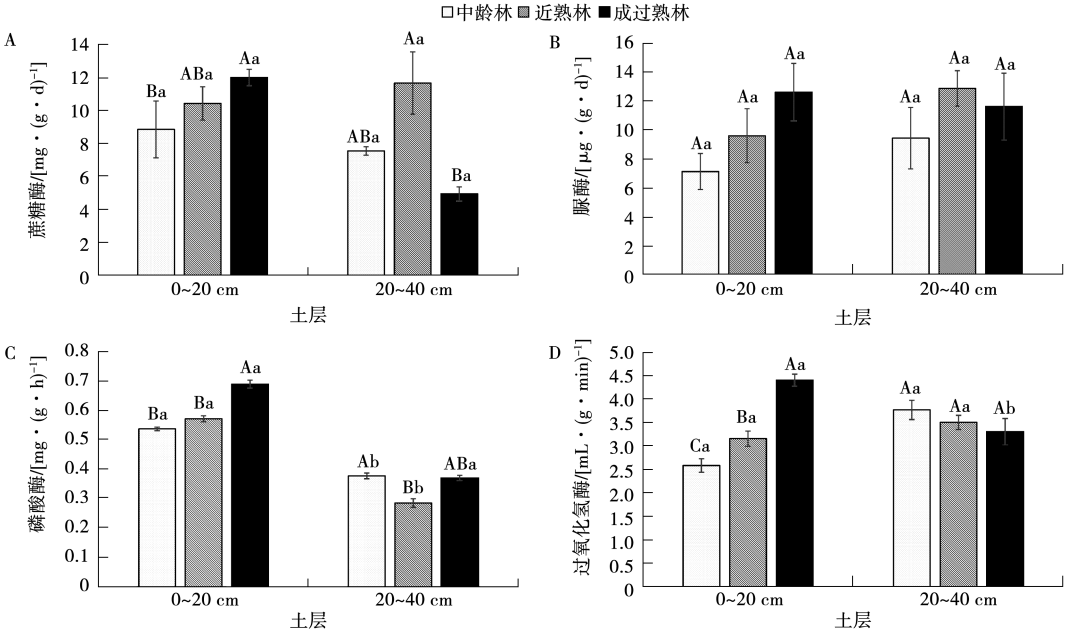


图 1 不同龄组马尾松人工林土壤酶活性的变化特征

注：不同大写字母表示相同土层不同龄组之间差异显著性($P<0.05$)；不同小写字母表示相同龄组不同土层之间差异显著性($P<0.05$)。下同。

2.2 不同龄组马尾松人工林 GRSP 含量的特征分析

2.2.1 EE-GRSP 由图 2A 可知,马尾松人工林土壤 EE-GRSP 含量范围为 $0.79 \sim 1.09 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 中龄林、近熟林和成过熟林在 0~20 cm 土层的 EE-GRSP 含量分别为 $1.03, 0.79$ 和 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 在 20~40 cm 土层分别为 $1.09, 0.84$ 和 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。相同土层 3 种龄组之间马尾松人工林 EE-GRSP 含量均无显著性差异。相同龄组两个土层之间马尾松人工林 EE-GRSP 含量也无显著性差异,EE-GRSP 含量在中龄林和近熟林中随着土层的加深而升高,但在成过熟林中随土层加深 EE-GRSP

含量反而呈现下降趋势。

2.2.2 T-GRSP 由图 2B 可知,马尾松人工林土壤 T-GRSP 含量范围为 $2.38 \sim 3.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 中龄林、近熟林和成过熟林在 0~20 cm 土层的 T-GRSP 含量分别为 $3.56, 2.38$ 和 $3.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 在 20~40 cm 土层分别为 $3.50, 2.66$ 和 $2.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。同一土层不同龄组之间马尾松人工林 T-GRSP 含量变化规律不一致,0~20 cm 土层中,中龄林 T-GRSP 含量显著高于近熟林 49.58%;20~40 cm 土层中,3 种龄组间 T-GRSP 含量无显著差异。相同龄组两个土层之间马尾松人工林 T-GRSP 含量无显著性差异。

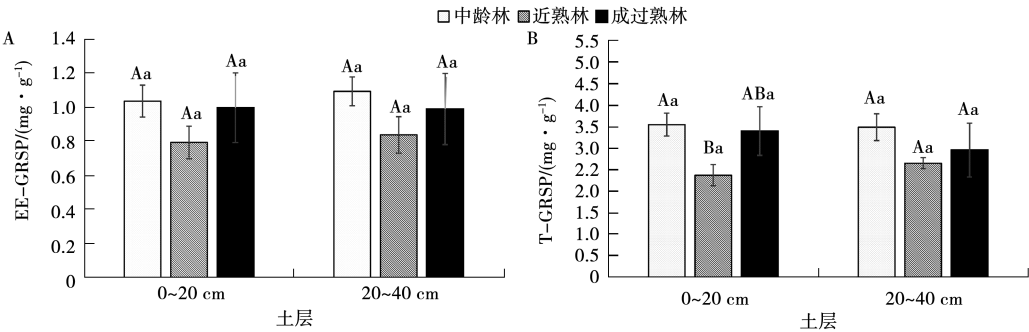


图 2 不同龄组马尾松人工林球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 含量的变化特征

2.3 土壤酶活性与 GRSP 含量相关性分析

如表 2 所示,过氧化氢酶活性与脲酶活性呈

显著正相关,EE-GRSP 含量与 T-GRSP 含量存在极显著正相关。

表 2 土壤酶活性与 GRSP 含量相关性分析

指标	蔗糖酶	脲酶	磷酸酶	过氧化氢酶	EE-GRSP	T-GRSP
蔗糖酶	1.000					
脲酶	−0.067	1.000				
磷酸酶	0.100	−0.158	1.000			
过氧化氢酶	0.036	0.283 *	−0.152	1.000		
EE-GRSP	0.035	0.004	0.049	0.092	1.000	
T-GRSP	−0.088	0.056	−0.117	0.028	0.728 * *	1.000

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, * * 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。下同。

2.4 土壤酶活性及 GRSP 含量与土壤理化性质相关性分析

将土壤酶活性和 GRSP 含量与前期研究的土壤理化性质^[29]进行相关性分析,结果如表 3 所示,磷酸酶活性与有机碳、碱解氮含量呈极显著正

相关,与全氮含量呈显著正相关;过氧化氢酶活性与全磷含量呈现极显著正相关,与容重、孔隙度、有机碳、全氮和碱解氮含量均呈显著正相关; T-GRSP 含量与含水量呈现极显著正相关。

表 3 土壤酶活性和 GRSP 含量与土壤理化性质相关性分析

指标	容重	含水量	孔隙度	有机碳	全氮	全磷	碱解氮	速效磷
蔗糖酶	0.127	0.172	0.130	0.170	0.117	0.076	−0.057	0.047
脲酶	−0.221	−0.018	−0.220	−0.037	−0.229	−0.105	−0.088	−0.101
磷酸酶	0.060	0.031	0.057	0.441 * *	0.301 *	−0.025	0.388 * *	−0.061
过氧化酶	0.283 *	0.206	0.282 *	0.255 *	0.282 *	0.323 * *	0.243 *	0.182
EE-GRSP	0.042	0.157	0.044	0.231	−0.022	−0.171	0.181	−0.144
T-GRSP	−0.144	0.313 * *	−0.142	−0.004	−0.197	−0.182	0.029	−0.202

3 讨论

3.1 龄组对土壤酶活性和 GRSP 含量的影响

本研究发现,在 0~20 cm 土层 4 种土壤酶活性均随林龄的增加而升高,这与宋思宇等^[30]和焦鹏宇等^[31]的研究结果相似。这可能是由于随着马尾松人工林的生长,它的凋落物变多,有利于树木下植物的生长发育和营养物质的积累,从而使微生物中的活性物质增加、代谢旺盛、繁殖加快,所以酶活性升高^[30-34]。在 0~20 cm 土层,成过熟林中蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性显著高于中龄林酶活性,这可能是因为在中龄林期间马尾松人工林林下植被较少,从而凋落物较少,土壤中的微生物种类和数量也较少,导致土壤酶活性较低^[33],但到成过熟林时期,森林生长茂盛,林下凋落物增多,在地下形成了茂密的根系,根系代谢产生的酚类物质增加,使土壤中的酶活性升高^[35]。

本研究还发现,0~20 cm 土层的中龄林中 T-GRSP 含量显著高于近熟林。可能是因为马尾

松人工林的叶子形态为细长针状,阳光能更好地透过林层,使林地内温度、湿度条件都处于一个较好的状态,但是从中龄林到近熟林,马尾松生长茂盛,导致林内郁闭度增大,光照时间变短,林地条件相对于中龄林时期较差,AM 真菌活性降低,产生的 GRSP 含量减少。

3.2 土层深度对土壤酶活性和 GRSP 含量的影响

本研究发现,中龄林磷酸酶活性和成过熟林过氧化氢酶活性均表现为 0~20 cm 显著高于 20~40 cm,这与范媛媛等^[36]的研究结果相似。可能是由于随土层深度加深,枯落物和腐殖质含量下降,养分含量也下降,20~40 cm 相对于 0~20 cm 土层的土壤温度更低,使微生物数量和活力下降,而 0~20 cm 土层有足够的水热条件,微生物活跃,酶活性较高,从而导致随土层深度的增加,酶活性出现降低的现象。

本研究还发现,GRSP 含量在 0~20 cm 土层

和 20~40 cm 土层之间无显著性变化,但部分学者的研究得出表层土壤 GRSP 含量显著高于深层土壤^[22,37-39]。这可能是因为研究的土样采集深度是 0~40 cm,而马尾松人工林因为根系发达的原因,可能其根系利用水分、养分和微量元素的能力在 0~40 cm 之间并未有明显差异,且 GRSP 含量不仅仅是由土层深度这个单一因素决定的,是由林龄、土壤类型、植被类型、土地利用方式、是否人为干扰等多重因素的作用下共同决定的,因此不同研究中 GRSP 含量在 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层之间的变化规律会有所不同。

3.3 土壤物理性质和土壤养分影响土壤酶活性和 GRSP 含量变化

本研究发现,土壤酶活性变化受孔隙度大小和土壤碳、氮含量的影响。孔隙度与土壤酶活性存在正相关关系^[40],孔隙度的大小可以反映土壤的疏松程度,孔隙度越大,土壤越疏松,通透性越强,供水能力越强,土壤中微生物生存的条件更好;土壤中的养分是通过微生物将动植物残骸进行分解转化得来的,土壤条件改善,有利于微生物的活动^[41],同时,微生物也需要分泌酶来利用这些养分维持正常的生命活动^[42-44],随着林龄上升,土壤湿度和酸性发生变化,加剧了土壤中的氮素限制和碳素矿化速率等,影响土壤微生物群落的组成和功能,从而调控了不同种类酶的分泌^[30,45-47]。

本研究还得出土壤物理性质是影响 GRSP 含量的因素,这与已有的系列研究结果一致^[30,35,48]。GRSP 是由丛枝菌根真菌菌丝释放到土壤中的一种疏水性糖蛋白^[49],真菌的生长需要适宜的条件,土壤含水量、容重和孔隙度可改变土壤中氧气含量和水分含量,为 AM 真菌提供充足的水分和氧气,在一定程度上影响 AM 真菌的呼吸作用,从而改变其活性,影响产生 GRSP 含量。

4 结论

研究表明,随着马尾松人工林恢复年限的增加,0~20 cm 土层蔗糖酶、脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性呈现逐渐上升的趋势,上升的幅度分别为 14.97%~35.37%、31.29%~76.64%、5.56%~27.78%和 22.09%~70.54%,而 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量均随马尾松人工林龄组的升高呈先下降后上升的趋势;中龄林、近熟林土壤磷酸酶活性及成过熟林土壤过氧化氢酶活性均随

土层深度增加显著降低,分别下降 29.63%、50.88%和 25.00%,而土层深度对土壤蔗糖酶、脲酶活性及 GRSP 含量均无显著影响;土壤磷酸酶活性、过氧化氢酶活性和 GRSP 含量与土壤养分和土壤理化性质存在显著的相关关系。

参考文献:

- [1] 刘艳,宋同清,蔡德所,等.喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1561-1568.
- [2] 李臻,梁月明,潘复静,等.不同林龄马尾松人工林土壤酶活性及其生态化学计量特征[J].桂林理工大学学报,2021,41(1):210-217.
- [3] 刘建忠,余娜.贵州省马尾松林地质量空间评价与低效林防控措施研究[J].湖北农业科学,2016,55(20):5202-5206.
- [4] 王燕云,赵龙杰,郝春莉,等.生物有机肥对不同连作年限设施黄瓜土壤微生物数量和酶活性的影响[J].浙江农业学报,2019,31(4):631-638.
- [5] ROSIER C L, HOYE A T, RILLIG M C. Glomalin-related soil protein: assessment of current detection and quantification tools[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(8): 2205-2211.
- [6] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等.辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J].应用生态学报,2015,26(9):2663-2672.
- [7] 孙彩丽,王艺伟,王从军,等.喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J].生态学报,2021,41(10):4140-4149.
- [8] HOLÁTKO J, BRTNICKÝ M, KUČERÍK J, et al. Glomalin-Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 153: 108-116.
- [9] JASTROW J D, MILLER R M, LUSSENHOP J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(7): 905-916.
- [10] 周琨,张森,薛新权,等.不同林龄马尾松人工林土壤酶变化特征研究[J].现代农业科技,2013(15):165-167.
- [11] 罗明霞,胡宗达,刘兴良,等.川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林土壤微生物生物量及酶活性[J].生态学报,2021,41(14):5632-5642.
- [12] 金章利,刘高鹏,周明涛,等.喀斯特山地草地土壤酶活性及土壤微生物碳代谢活性研究[J].水土保持研究,2020,27(3):37-44.
- [13] 严绍裕.不同林龄湿地松林土壤酶活性与土壤养分特征[J].森林与环境学报,2020,40(1):24-29.
- [14] 龙文靖,倪先林,刘天朋,等.国家高粱原种扩繁基地土壤养分和酶的垂直分布特性[J].农学学报,2019,9(5):33-37.
- [15] 舒洪岚.杉木人工林土壤理化性质及酶活性的变化规律[J].贵州农业科学,2010,38(9):81-83,87.

- [16] 于德良,雷泽勇,张岩松,等.沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J].干旱区研究,2019,36(3):621-629.
- [17] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J].应用生态学报,2012,23(2):445-451.
- [18] 邸涵悦,郝好鑫,孙兆祥,等.不同演替阶段下球囊霉素相关土壤蛋白对团聚体稳定性的影响[J].生态环境学报,2021,30(4):718-725.
- [19] 祝飞,赵庆辉,邓万刚,等.不同土地利用方式下球囊霉素相关土壤蛋白与有机碳及土壤质地的关系[J].安徽农业科学,2010,38(23):12499-12502.
- [20] 权常欣,马玲玲,林钊凯,等.广东省森林球囊霉素相关土壤蛋白含量及影响因素[J].生态环境学报,2020,29(2):240-249.
- [21] 金涛涛,赵明,吴佳海,等.庐山常绿阔叶林常见树种根际球囊霉素相关土壤蛋白分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2021,40(9):2698-2708.
- [22] 沈育伊,滕秋梅,徐广平,等.桂林会仙岩溶湿地土地利用方式对球囊霉素相关土壤蛋白分布的影响[J].地球学报,2022,43(4):491-501.
- [23] 陈胜仙,张喜亨,余丹琦,等.森林植物多样性、树种重要值与土壤理化性质对球囊霉素相关土壤蛋白的影响[J].生物多样性,2022,30(2):51-63.
- [24] 吴治澎,黄吉东,吴鹏豹,等.大田土壤球囊霉素相关土壤蛋白分解及其与土壤特征的关系[J].广东农业科学,2013,40(13):65-67,71.
- [25] 刘小娥,苏世平,李毅.兰州市南北两山典型灌丛土壤理化性质[J].草业学报,2021,30(6):28-39.
- [26] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [27] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:中国农业出版社,1984.
- [28] WRIGHT S F, UPADHYAYA A, BUYER J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(13): 1853-1857.
- [29] 武燕,黄青,刘讯,等.西南喀斯特地区马尾松人工林林龄对土壤理化性质的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(3):99-107.
- [30] 宋思宇,陈亚梅,汪涛,等.不同林龄的西藏林芝云杉人工林土壤酶活性及化学计量比特征[J].应用与环境生物学报,2023,29(1):178-185.
- [31] 焦鹏宇,郭文,陈泽龙,等.中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征[J].环境科学,2022,43(2):1059-1068.
- [32] 涂程伟,彭彩云,柳苹玉,等.华西雨屏区不同林龄杉木人工林土壤酶活性的动态变化[J].东北林业大学学报,2021,49(7):91-95.
- [33] 段春燕,何成新,徐广平,等.桂北不同林龄桉树人工林土壤养分及生物学特性[J].热带作物学报,2019,40(6):1213-1222.
- [34] 曹升,潘菲,林根根,等.不同林龄杉木林土壤细菌群落结构与土壤酶活性变化研究[J].生态学报,2021,41(5):1846-1856.
- [35] 宫欢欢,尤一泓,林勇明,等.不同林龄木麻黄纯林土壤酶活性与土壤养分研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):516-524.
- [36] 范媛媛,李懿,李启迪.不同林龄油松土壤微生物、酶活性和养分特征[J].水土保持研究,2019,26(6):58-64.
- [37] 贺海升,王琼,裴忠雪,等.落叶松人工林球囊霉素相关土壤蛋白与土壤理化性质空间差异特性[J].生态学杂志,2015,34(12):3466-3473.
- [38] 张健,徐明,王阳,等.黔中地区不同马尾松群丛土壤球囊霉素分布特征[J].生态环境学报,2021,30(12):2303-2308.
- [39] 阙弘,葛阳洋,康福星,等.南京典型利用方式土壤中球囊霉素含量及剖面分布特征[J].土壤,2015,47(4):719-724.
- [40] 岳大然,张嘉怡,梁昌宝.园林废弃有机物修复城市森林土壤研究进展[J].世界林业研究,2023,36(2):38-44.
- [41] LI J, ZHOU X, YAN J, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 87: 56-62.
- [42] KNELMAN J E, GRAHAM E B, TRAHAN N A, et al. Fire severity shapes plant colonization effects on bacterial community structure, microbial biomass, and soil enzyme activity in secondary succession of a burned forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 90: 161-168.
- [43] CRECCHIO C, CURCI M, PIZZIGALLO M D R, et al. Effects of municipal solid waste compost amendments on soil enzyme activities and bacterial genetic diversity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(10): 1595-1605.
- [44] 郭辉,唐卫平.不同林龄华北落叶松根际与非根际土壤酶和土壤微生物研究[J].生态环境学报,2020,29(11):2163-2170.
- [45] XIAO W, CHEN X, JING X, et al. A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 123: 21-32.
- [46] PUISSANT J, CÉCILLON L, MILLS R T E, et al. Seasonal influence of climate manipulation on microbial community structure and function in mountain soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: 296-305.
- [47] AI C, LIANG G, SUN J, et al. The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51: 465-477.
- [48] 朱彩丽,黄宝灵,黄娟萍,等.广西3种珍贵树种人工林土壤养分状况及酶活性比较[J].南方农业学报,2015,46(11):1953-1957.
- [49] WRIGHTS F, UPADHYAYA A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Soil Science, 1996, 161(9): 575-586.

Characteristics of Soil Enzyme Activity and GRSP Content in *Pinus massoniana* Plantation in Karst Area of Southwest China

SONG Xuehong¹, ZHENG Rui¹, WU Yan^{1,2}

(1. School of Biological Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550018, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Forest Fire Ecology and Management, Guiyang 550018, China)

Abstract: In order to scientifically grasp and explore the characteristics of soil environment in Karst Areas of Southwest China, formulate reasonable management measures for plantation forests, and promote the restoration of soil fertility in karst ecologically fragile areas. In this study the soil of *Pinus massoniana* plantation in Fenggang County, Zunyi City, Guizhou Province was selected as the research object. The effects of three age groups and soil layer changes on soil enzyme activity and GRSP content were analyzed, and the relationship between the two and soil physical properties and soil nutrients was also analyzed. The results showed that, (1) the changes of age groups had significant effects on soil enzyme activities. The activities of four soil enzymes in the 0—20 cm soil layer increased with the increase of forest age. The sucrase activities of the soil of the *Pinus massoniana* plantation in the 0—20 cm soil layer were 8.85, 10.42 and 11.98 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ in the middle-aged forest, the near-mature forest and the over-mature forest, respectively. The phosphatase activities were 0.54, 0.57 and 0.69 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, and the catalase activities were 2.58, 3.15 and 4.40 $\text{mL} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, respectively. The sucrase activity of soil in over-mature forest was significantly higher than that in middle-aged forest, and the activities of phosphatase and catalase in soil of over-mature forest were significantly higher than those in middle-aged forest and near mature forest. (2) Soil layer changes had significant effects on soil phosphatase and catalase activities. Under the same age group, soil phosphatase activities of middle-aged forest and near-mature forest in the 20—40 cm soil layer were significantly lower than those in the 0—20 cm soil layer, decreasing by 29.63% and 50.88%, respectively. The catalase activity of over-mature forest in the 20—40 cm soil layer was significantly lower than that in the 0—20 cm soil layer by 25.00%. (3) The contents of EE-GRSP and T-GRSP in 0—20 cm soil layer and 20—40 cm soil layer were in the order of middle-aged forest > over-mature forest > near-mature forest, and the T-GRSP content in 0—20 cm soil layer was 3.56 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, which was significantly higher than that in near-mature forest by 52.14%. (4) The correlation analysis results showed that the main factors affecting soil enzyme activity were volume weight, porosity, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and alkali-hydrolyzed nitrogen content, while GRSP content was mainly affected by soil physical properties. In conclusion, the change of age group had a significant effect on soil enzyme activity of *Pinus massoniana* plantation, and soil phosphatase activity, catalase activity and GRSP content were significantly correlated with soil nutrients and physical and chemical properties. The results indicate that the soil quality and fertility can be restored and improved by adjusting the age group composition of *Pinus massoniana* plantation and the corresponding changes in soil nutrient content in Karst Degraded Areas.

Keywords: Karst; *Pinus massoniana* plantation; soil enzyme activity; Glomalin-Related Soil Protein (GRSP)

欢迎关注本刊微信公众号

