

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.026.

刘少华, 赵敏, 王亚娟, 等. 黄土丘陵区林分密度对人工刺槐林土壤理化性质及酶活性影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 123-129, 138.

Liu Shaohua, Zhao Min, Wang Yajuan, et al. Effects of Stand Density on Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities in *Robinia pseudoacacia* Plantations in the Loess Hilly-Gully Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 123-129, 138.

黄土丘陵区林分密度对人工刺槐林 土壤理化性质及酶活性影响

刘少华¹, 赵敏¹, 王亚娟¹, 孙亚荣¹, 陈云明^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨陵 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: [目的] 探讨陕北黄土丘陵沟壑区刺槐人工林土壤理化性质及土壤酶活性随林分密度的变化趋势以及土壤理化性质和土壤酶活性的关系, 以期明确改善该区刺槐人工林土壤质量的适宜林分密度, 阐明影响土壤养分可利用性的主导环境因子, 为该地区刺槐人工林高质量发展的修复模式提供理论依据。[方法] 以位于黄土丘陵沟壑区的陕西省延安市安塞区县南沟流域的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林为研究对象, 分析了高(1 500 株/hm²)、中(1 200 株/hm²)、低(900 株/hm²) 3 种林分密度之间土壤理化性质和土壤酶活性的差异, 利用冗余分析探讨了土壤酶活性与土壤理化性质的关系。[结果] (1) 中密度土壤含水率、有机碳、全氮、有效磷和硝态氮含量均显著高于低、高密度; (2) 土壤 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、蔗糖酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶、脲酶、亮氨酸氨基肽酶和 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性均随林分密度增大呈先降低后升高趋势, 在 1 200 株/hm² 时最低; (3) Pearson 相关性分析结果表明与土壤碳、氮、磷循环相关的酶活性与对应的养分含量呈显著负相关关系; (4) 冗余分析结果显示: 土壤有机碳、全氮和全磷对土壤酶活性的解释度显著, 分别解释了土壤酶活性变异的 59.8% ($p < 0.01$), 20.8% ($p < 0.01$) 和 9.5% ($p < 0.05$), 土壤有机碳含量是影响土壤酶活性的主要因子。[结论] 中等密度(1 200 株/hm²) 有利于提高刺槐林土壤养分、水分含量, 是一种适宜的刺槐林营林措施, 同时应注重土壤有机碳含量变化, 以期及时采取林分密度调控措施, 从而改善土壤酶活性, 进而提高土壤养分水平, 促进刺槐林质量提升。

关键词: 刺槐人工林; 林分密度; 土壤理化性质; 土壤酶活性

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0123-07

Effects of Stand Density on Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities in *Robinia pseudoacacia* Plantations in the Loess Hilly-Gully Region

Liu Shaohua¹, Zhao Min¹, Wang Yajuan¹, Sun Yarong¹, Chen Yunming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water
Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to determine the appropriate stand density, and to provide the reference for implementing effective restoration practices for improving soil quality of *Robinia pseudoacacia* plantation in the hilly and gully region of the Loess Plateau in China by analyzing the response of soil physicochemical properties and enzyme activities to stand density changes and the relationship between soil physicochemical properties and enzyme activities. [Methods] *R. pseudoacacia* plantations of three stand density classes—low density (900 trees/hm²), medium density (1 200 trees/hm²), and high density (1 500

收稿日期: 2023-09-25

修回日期: 2023-10-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“抚育间伐调控黄土丘陵区刺槐人工林水分养分机理研究”(41771556)

第一作者: 刘少华(1998—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为流域管理。E-mail: 2783159733@qq.com

通信作者: 陈云明(1967—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植被生态与水土保持研究。E-mail: ymchen@sm.iswc.ac.cn

<http://stbcy.paperonce.org>

trees/hm²) density—were sampled in the Xiannangou watershed of Ansai County in loess hilly-gully region of northern Shaanxi Province, China. We analyzed the effects of stand density on soil physicochemical properties, enzyme activities, and determined the relationship between soil physicochemical properties and enzyme activities by redundancy analysis. [Results] (1) Compared to low-and high-density plantations, medium density plantations significantly increased soil water content, soil organic carbon, soil total nitrogen, soil available phosphorus, and soil nitrate nitrogen. (2) With the increasing in stand density, the soil enzyme activities, including β -glucosidase, cellulase, invertase, polyphenoloxidase, catalase, urease, leucine aminopeptidase, and N-acetyl- β -glucosaminidase decreased first and then increased, and were the lowest at medium density plantations. (3) Pearson analysis showed that soil enzyme activities related to carbon, nitrogen, and phosphorus cycle negatively were correlated with the content of the corresponding resource. (4) Results of redundancy analysis showed that soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus had significant effects on soil enzyme activities. Soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus explained 59.8% ($p < 0.01$), 20.8% ($p < 0.01$), and 9.5% ($p < 0.05$) of the variation of soil enzyme activities, respectively. [Conclusion] Medium density (1 200 trees/hm²) can help to conserve soil nutrient and water of *R. pseudoacacia* plantation, and thus is a suitable stand density management strategy for *R. pseudoacacia* plantations to improve soil quality. Furthermore, managers should pay attention to the changes in soil organic carbon content to implement stand density controlling to improve soil enzyme activity and hence enhance soil nutrient availability and promote the improvement of *R. pseudoacacia* plantations.

Keywords: *Robinia pseudoacacia* plantation; stand density; soil physicochemical properties; soil enzyme activity

林分密度是影响人工林生态系统结构和功能的主要因子之一^[1]。合理的林分密度具有良好的光、热、水、肥等营养环境,有利于植物生长及土壤养分循环^[2],对提高人工林可持续发展具有重要作用^[3]。

土壤养分对促进林木生长及维护森林生态系统结构和功能稳定具有重要作用^[4]。土壤酶来源于土壤微生物活动、植物根系分泌和动植物残体腐解过程^[5],调控土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)循环过程^[6],其活性与土壤养分可利用性息息相关^[7]。已有研究表明林分密度可通过影响林分光、热、水等资源的可利用性^[8],造成林下植被组成、枯落物的输入量及质的差异^[9],进而影响土壤微生物活性,并进一步影响土壤酶活性和土壤养分可利用性^[10]。例如研究发现降低林分密度降低了林分冠层盖度,林分可利用光源增加提高了土壤温度,进而提高了微生物活性,使得与土壤 N、P 循环相关的土壤水解酶活性增加,土壤全 N、有效 N、有效 P 含量随之提高,促进了地上植被生长^[11]。然而也有研究发现随林分密度的降低提高了水分蒸散速率,土壤水分的减少抑制了微生物活性及其代谢产酶能力,导致酶活性降低^[12],进一步影响土壤养分循环过程,不利于土壤 C、N、P 可利用性的提高^[13]。由此可见,林分密度可通过影响土壤酶活性,进而影响土壤养分可利用性,并对植物生长产生一定作用,探究林分密度对刺槐林土壤酶活性的影响,对于明确密度调控刺槐林养分的机制极为重要。此外,

林分密度对土壤酶活性的影响与植被类型紧密相关,使得不同林分改善土壤养分水平以维持林分正常生长的适宜密度也存在差异,如刘慧敏等^[3]研究发现,林分密度为 1 402 株/hm²时华北落叶松人工林土壤 C、N 和 P 等养分含量均较高;然而,赵汝东等^[14]发现林分密度为 1 560 株/hm²时利于提高马尾松人工林土壤有机质、全 N、全 P 等含量,利于地上植被生长。总之,调控林分密度是改善人工林生态系统结构和功能的有效措施,且因研究区域立地条件、植被类型、林龄、植被生物学特性的差异,使得林分密度对土壤酶活性及土壤理化性质的影响不同,因此有必要进一步研究林分密度对人工林土壤酶活性及土壤理化性质的影响,这有助于明确林分维持适宜密度以改善土壤养分和水分等资源可利用性的密度调控机制。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是黄土丘陵区的主要造林树种之一,自大规模种植以来,有效遏制了水土流失、改善了当地生态环境^[15]。但在造林时存在较大面积以绿化为目的且密度不合理的林分,这些林分内树木生长缓慢^[13,16-17]、植被稀少^[9]、土壤养分匮乏,不利于刺槐林生态系统结构和功能稳定^[18],因此确定合理的林分密度是刺槐林可持续发展的前提。基于此,本研究以陕西省延安市安塞区刺槐人工林为研究对象,通过研究林分密度对土壤理化性质和酶活性的影响以及土壤酶活性和土壤理化性质之间的关系,以期揭示林分密度对土壤养分的调控机制,明确

提高刺槐林土壤质量的适宜密度,为该区刺槐林质量的精准提升提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞区(36°30′—37°19′N, 108°51′—109°26′E;海拔 1 010~1 400 m),该区属于典型黄土丘陵沟壑区,气候为暖温带半干旱大陆性季风气候,年均温 8.8 ℃,多年平均降水量 530 mm,其中 7—9 月的降水量占全年降水的 60%以上。土壤以黄绵土为主。天然植被已经遭受大面积破坏,目前现有植被以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林为主。其他主要灌木和草本植物有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia stechmanniana*)等。

1.2 样品采集与处理

于 2022 年 7 月下旬,选取 3 种不同现存密度 1 500 株/hm²(高密度),1 200 株/hm²(中密度)和 900 株/hm²(低密度)的刺槐人工林,每个密度共设置 3 个 20 m×20 m 重复样地。在各样地内开展每木检尺,测定林木树高和胸径,并记录海拔、坡向、坡度等因子(表 1)。在各样地内,使用土钻随机采集 4 个 0—20 cm 土样,并将其混合为一个样品,立即放入便携式冰盒中,用于后续土壤理化性质等分析。挑除土样中的根系、动物残体等杂质后过 2 mm 筛,将土样分为 2 部分,一部分自然风干以备测定土壤有机 C、全 N、土壤含水量等理化性质指标,另一部分置于 4 ℃冰箱内冷藏保存,以备测定土壤酶活性。

表 1 不同密度刺槐人工林样地信息

Table 1 Information of *Robinia pseudoacacia* plantation plots with different stand densities

参数	林分密度		
	低密度	中密度	高密度
海拔/m	1058	1102	1014
坡向	半阳坡	半阳坡	半阳坡
坡度/(°)	20	20	20
平均胸径/cm	12.63±0.8	15.54±0.9	10.56±0.1
平均树高/m	12.91±0.5	14.5±0.3	11.23±0.9
林龄/a	21	21	21

1.3 土壤理化性质及酶活性测定

分别采用重铬酸钾稀释热法、凯氏定氮法、NaOH 碱解扩散法、测定土壤有机 C 含量、全 N 和土壤有效 N 含量。土壤有效 N 包括铵态 N 和硝态 N。利用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤全 P 和有效 P 含量。

利用 pH 计测定土壤 pH^[19]。利用烘干法和环刀法分别测定土壤含水量和土壤容重。

本研究测定了与土壤 C、N、P 循环相关的酶活性,与土壤 C 循环相关的酶包括:β-葡萄糖苷酶、纤维素酶、蔗糖酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶;与土壤 N 循环相关的酶包括:亮氨酸氨基肽酶、N-乙酰氨基葡萄糖苷酶、脲酶;与土壤磷循环相关的酶为碱性磷酸酶。利用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定纤维素酶活性,酶活性以 72 h 后 10 g 土壤生成的葡萄糖毫克数表示^[20];利用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定脲酶活性,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₄⁺-N 的毫克数表示^[5]。分别采用高锰酸钾滴定法、比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法测定过氧化氢酶活性、多酚氧化酶活性和蔗糖酶活性^[21],三者的酶活性分别以 20 min 后 1 g 土壤中的 0.1 N 高锰酸钾的毫升数、2 h 后 1 g 土壤中紫色没食子素的毫克数和 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示。碱性磷酸酶测定采用磷酸苯二钠比色法,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的毫克数表示^[7]。β-葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶采用对硝基酚比色法测定,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中产生 1 μmol 对硝基苯酚表示(μmol/g/d)^[6]。

1.4 数据处理

利用单因素方差分析法(One-way ANOVA)比较不同林分密度间土壤理化性质和酶活性的差异,用邓肯(Duncan)法进行显著性多重比较($p<0.05$);利用 Pearson 相关性分析土壤理化性质与土壤酶活性各指标两两之间的相关性;利用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)分析刺槐人工林土壤理化性质与土壤酶活性关系。采用 OriginPro 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 林分密度对土壤理化性质的影响

林分密度对土壤容重、含水率、有机 C、全 N、有效 P 和硝态 N 含量具有显著影响(表 2)。随密度升高,土壤容重、含水率、有机 C、全 N、有效 P 和硝态 N 含量均呈先升高后降低的趋势,在中密度最高。相比高密度林分,低密度和中密度土壤含水率分别增加了 13.3%和 23.9%;中密度林分土壤有机 C 含量比低密度和高密度林分高 38.2%和 13.1%;中密度林分土壤全 N 含量比低密度和高密度林分高 17.0%和 25.0%;中密度林分土壤有效 P 含量比低密度和高密度林分高 93.3%和 30.3%;中密度林分土壤硝态 N 含量比低密度和高密度林分高 56.8%和 41.5%;土壤 pH、全 P 和铵态 N 在不同密度林分间无显著差异。

表 2 刺槐人工林不同林分密度土壤理化性质特征

Table 2 Soil physical and chemical properties of *Robinia pseudoacacia* plantations with different stand densities

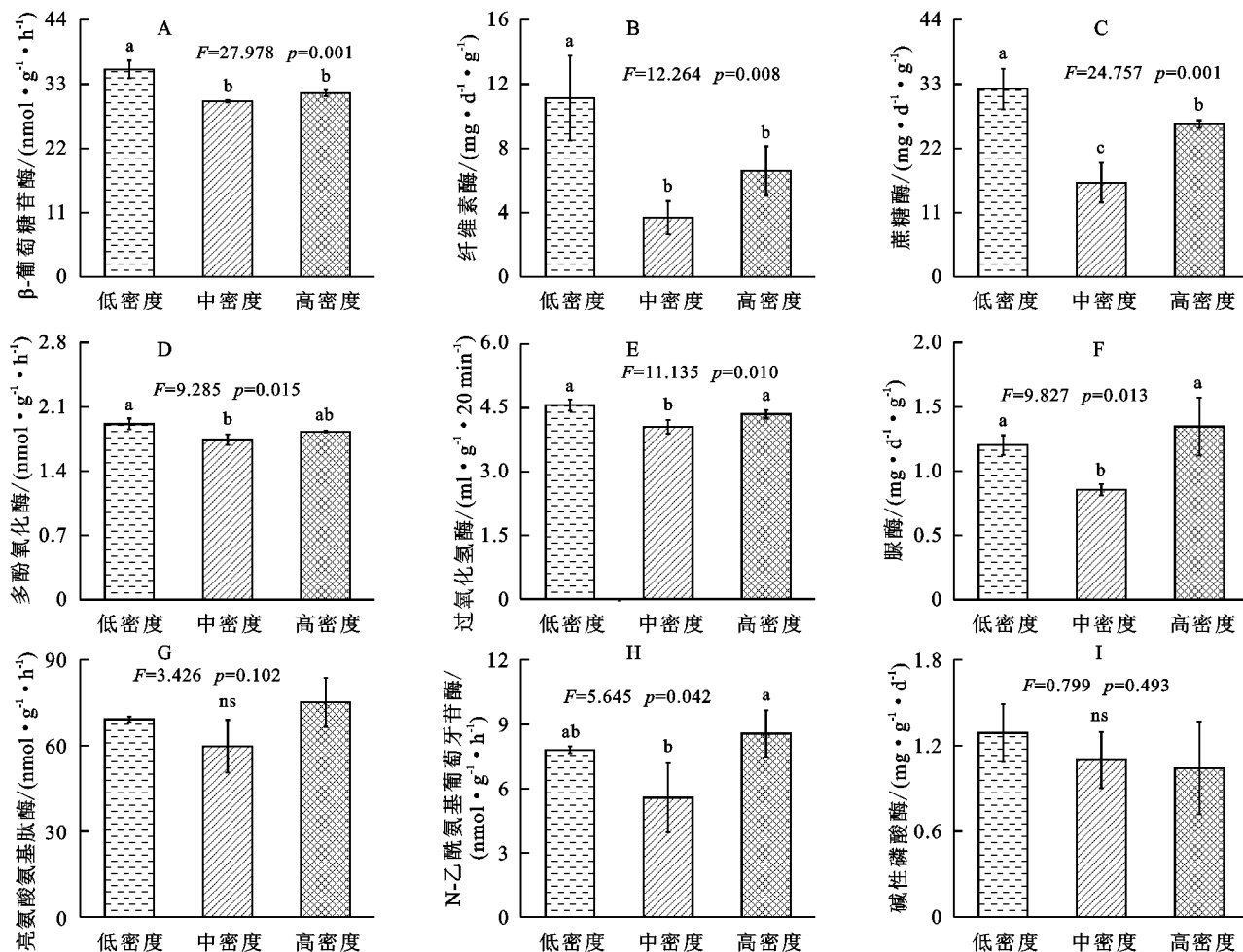
土壤理化性质	林分密度			F	p
	低密度	中密度	高密度		
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.36±0.04ab	1.43±0.06a	1.25±0.06b	7.51	0.023
含水率/%	12.33±0.30b	13.48±0.65a	10.88±0.68c	15.56	0.004
pH 值	8.43±0.06a	8.49±0.02a	8.40±0.11a	1.29	0.341
有机碳/(g·kg ⁻¹)	6.32±0.80c	8.74±0.11a	7.73±0.32b	17.81	0.003
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.47±0.02b	0.55±0.03a	0.44±0.05b	6.31	0.033
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.51±0.01a	0.54±0.02a	0.54±0.05a	0.75	0.512
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.89±0.33b	1.72±0.16a	1.32±0.31ab	6.86	0.028
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	7.69±0.73b	12.06±2.21a	8.52±0.12b	8.89	0.016
铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	0.70±0.13ab	0.91±0.07a	0.64±0.12b	5.06	0.052

注:不同小写字母代表不同林龄之间差异显著($p < 0.05$),数值为平均值±标准误差。

2.2 林分密度对土壤酶活性变化的影响

土壤 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、蔗糖酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶、脲酶和 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性均随林分密度的增大表现为先降低后升高趋势,均在低密度最低。低密度林分土壤 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、蔗糖酶活性显著高于中密度和高密度($p < 0.05$);中

密度林分土壤多酚氧化酶、过氧化氢酶和脲酶活性显著低于低密度和高密度($p < 0.05$)。土壤 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性在低密度达到最大;随林分密度的增加,土壤亮氨酸氨基肽酶活性呈现先降低后升高的趋势,但不同密度之间没有显著性差异($p > 0.05$);林分密度对碱性磷酸酶活性没有显著性影响(图 1)。



注:不同小写字母表示不同林龄间有显著差异,ns表示无显著性差异。

图 1 刺槐人工林不同林分密度土壤酶活性特征

Fig. 1 Soil enzyme activity of *Robinia pseudoacacia* plantations with different stand densities

2.3 土壤理化性质与酶活性的相关性分析

由表 3 看出,N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性与土壤含水率呈显著负相关($p<0.05$), β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、蔗糖酶等其余酶活性与土壤含水率均无显著相关性关系($p>0.05$);土壤 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、蔗糖酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性与土壤有机 C、有效 P 和硝态 N 均呈显著负相关关系($p<0.05$),其余酶活性与土壤有机 C、有效 P 和硝态 N 无显著相关性关系($p>0.05$);土壤过氧化氢酶、脲酶、亮氨

酸氨基肽酶和 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性与土壤全 N 呈显著负相关关系($p<0.05$),其余酶活性与土壤全 N 无显著相关性($p>0.05$);除土壤碱性磷酸酶活性与土壤全 P 呈显著负相关关系外($p<0.05$),其余酶活性与土壤全 P 均无显著相关性关系($p>0.05$);土壤亮氨酸氨基肽酶和 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性与土壤铵态 N 呈显著负相关关系($p<0.05$),其余酶活性与土壤铵态 N 无显著相关性关系($p>0.05$)。

表 3 刺槐林土壤理化性质与酶活性之间的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis of soil physicochemical properties and enzyme activities in *Robinia pseudoacacia* plantations

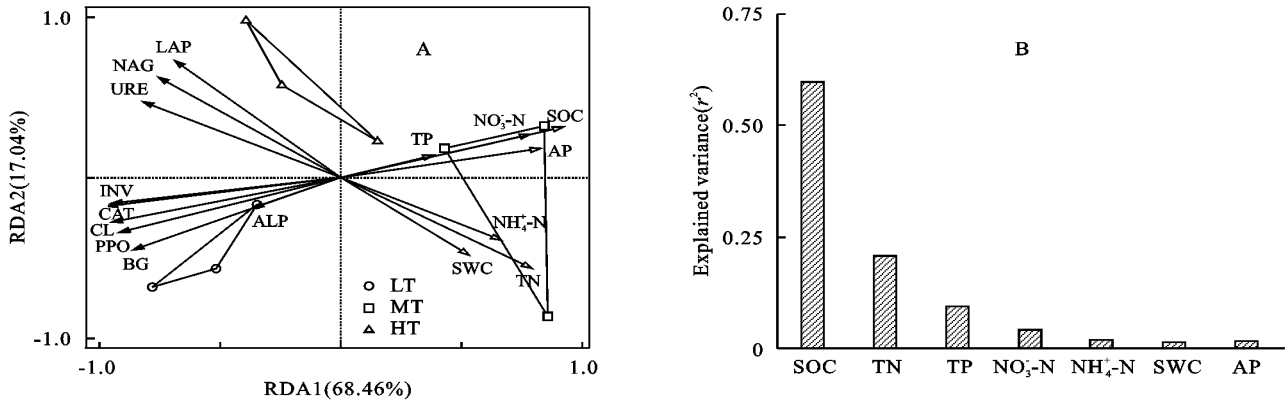
指标	土壤含水率	pH	有机碳	全氮	全磷	有效磷	硝态氮	铵态氮
β -葡萄糖苷酶	-0.16	-0.03	-0.95**	-0.38	-0.44	-0.77*	-0.70*	-0.46
纤维素酶	-0.28	-0.01	-0.97**	-0.50	-0.42	-0.82**	-0.76*	-0.51
蔗糖酶	-0.54	-0.25	-0.93**	-0.63	-0.25	-0.82**	-0.88**	-0.64
多酚氧化酶	-0.41	-0.13	-0.94**	-0.53	-0.27	-0.82**	-0.85**	-0.48
过氧化氢酶	-0.46	-0.18	-0.93**	-0.67*	-0.34	-0.82**	-0.82**	-0.57
脲酶	-0.66	-0.48	-0.58	-0.97**	-0.38	-0.61	-0.62	-0.61
亮氨酸氨基肽酶	-0.64	-0.21	-0.42	-0.93**	-0.21	-0.46	-0.30	-0.74*
N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	-0.67*	-0.34	-0.53	-0.93**	-0.23	-0.52	-0.41	-0.77*
碱性磷酸酶	0.44	-0.07	-0.53	-0.21	-0.95**	-0.34	-0.07	0.20

注:*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著;**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

2.4 土壤酶活性影响因素分析

分别以土壤酶活性和土壤理化因子作为响应变量与解释变量进行冗余分析。结果表明,第一轴和第二轴对变量的解释度分别为 68.46%和 17.04%,土壤理化因子对土壤酶活性的总累积解释度为 85.50%。

土壤有机 C、全 N 和全 P 对土壤酶活性的解释度显著。分别解释了土壤酶活性变异的 59.8%,20.8%和 9.5%,硝态 N、氨态 N、土壤水分和土壤有效 P 对土壤酶活性的影响均不显著($p>0.05$)(图 2)。



注:SWC 表示土壤含水率;SOC 表示有机碳;TN 表示全氮;TP 表示全磷;AP 表示有效磷;NO₃⁻-N 表示硝态氮;NH₄⁺-N 表示铵态氮;BG 表示 β -葡萄糖苷酶;CL 表示纤维素酶;INV 表示蔗糖酶;PPO 表示多酚氧化酶;CAT 表示过氧化氢酶;URE 表示脲酶;LAP 表示亮氨酸氨基肽酶;NAG 表示 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶;ALP 表示碱性磷酸酶;LT 表示低密度刺槐人工林;MT 表示中密度刺槐人工林;HT 表示高密度刺槐人工林。

图 2 土壤酶活性与土壤理化性质的冗余分析(RDA)

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) of soil enzyme activity and soil physical and chemical properties

3 讨论

林分密度的变化可通过改变林分结构,使得林下植被多样性、凋落物质及量和土壤微环境随之发生变化,影响土壤微生物结构和代谢活性,进而影响土壤

酶活性和土壤养分含量^[22]。本研究发现,随林分密度的增加,与土壤 C、N、P 循环相关的酶活性均呈先降低后升高的趋势,在中等林分密度达到最低。这可能是与中密度刺槐林土壤有机 C 含量较高有关。土壤有机 C 作为微生物代谢活动所需要的能量,其含

量越高,可能与土壤有机质分解相关的酶促反应产生负反馈,进而降低了合成酶所需能量,使微生物能有效利用土壤养分,从而抑制了土壤酶活性^[23]。另外,本研究冗余分析结果表明土壤有机C含量能解释土壤酶活性变化的59.8%,可被认为是影响土壤酶活性的主要驱动因子,这与解梦怡等^[24]的研究结果一致,这进一步说明了C源作为微生物分解有机物获得生长繁殖所需的能量,土壤有机C含量的变化与微生物生长及代谢活性紧密相关^[25]。因此在刺槐林经营管理过程中,应注重土壤有机碳含量的变动,以期及时采取林分密度调控措施,从而改善土壤酶活性,进而提高土壤养分水平,以促进植被生长。本研究中,Pearson相关性分析结果显示,与土壤C、N、P循环相关的酶活性与相应的资源含量(C或N或P)呈显著负相关关系,而且土壤酶活性和土壤养分含量(有机C、全T、有效P、硝态N等)随林分密度变化的规律恰恰相反,进一步证实了当土壤资源可利用性降低时,微生物可通过分泌胞外酶以促进有机质的分解并将有机养分转换为植物和微生物可利用的形式^[26]。

多数研究结果表明随林分密度的升高,土壤养分含量呈现先升高后降低的趋势^[27]。本研究也发现相同的规律,土壤有机C、全N、有效P和硝态N等均随林分密度升高呈现先增大后减小的趋势,且在中等林分密度下最高。一方面,林分密度降低可能使得地表裸露,加剧了土壤风蚀和水蚀,土壤养分也会随之流失;另一方面,地表凋落物作为土壤养分的主要有机质来源,凋落物的量及分解速率与土壤养分含量紧密相关^[28]。尽管高密度有利于乔木层凋落物的积累,从而为土壤养分提供丰富有机质来源,但高密度通常导致林分郁闭,凋落物分解速率和养分归还量下降,土壤养分也随之降低^[16]。再者,已有研究表明土壤水分含量与土壤N、P可利用性水平息息相关,土壤水分可利用性的降低不仅会导致土壤养分的运移严重受阻,而且土壤有效性养分容易与土壤颗粒和矿物结合形成无效性养分^[29]。低密度条件下,林分郁闭度减小,冠层能够获得更多的太阳辐射,加剧了地表水分蒸发,使得土壤水分可利用性降低^[13],而且在低密度林分内,地表枯落物少,林地蒸发量和地表径流量大,土壤含水量相应降低^[17],进而不利于土壤N、P含量的提高,另外,刺槐作为一种速生树种,对水分的需求量大,高密度林分可能会加剧林木对土壤水分的竞争,导致土壤干旱,不利于土壤养分循环。相比低密度和高密度林分,中等密度林分结构良好,改善了林内透光度和穿透雨量等因子,利于凋落物分解及其养分归还土壤,进而提高了土壤有机C、全N

等含量^[3]。当前研究结果表明,林分密度对土壤全P含量无显著影响,主要因为P素是一种沉积性元素,与土壤有机C和全N主要来自地表枯落物分解归还不同,其主要来自岩石的风化和淋洗,且迁移扩散能力较低,扩散较慢^[30]。总之,中等密度1200株/hm²有利于提高刺槐林土壤养分、水分含量,是一种比较合适的刺槐林人工林营林措施。

4 结论

本研究通过研究密度对刺槐人工林土壤理化性质及酶活性的影响,发现随密度的增加,土壤有机C、全N、全P、氨态N、土壤水分等呈现先增加后降低的趋势,在中等密度1200株/hm²最高,而与土壤C、N、P循环相关的酶活性在中等密度1200株/hm²最低,且与相应的资源含量(C或N或P)呈显著负相关关系。土壤有机碳是影响土壤酶活性的主要因素,因此在刺槐林人工林经营过程中,要注重土壤有机碳含量变化,及时采取林分密度调控措施,从而改善土壤酶活性,进而提高土壤养分水平,以利于刺槐林质量提升。总之,中密度1200株/hm²有利于提高刺槐林土壤养分、水分含量,是一种比较合适的刺槐林人工林营林措施。

参考文献(References):

- [1] 舒韦维,卢立华,李华,等.林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J].生态学报,2021,41(11):4521-4530.
Shu W W, Lu L H, Li H, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [2] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4): 210-216.
- [3] 刘慧敏,韩海荣,程小琴,等.不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响[J].北京林业大学学报,2021,43(6):50-59.
Liu H M, Han H R, Cheng X Q, et al. Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 50-59.
- [4] 赵伟文,梁文俊,魏曦.不同林分密度华北落叶松人工林土壤养分特征[J].西南师范大学学报:自然科学版,2019,44(4):84-92.
Zhao W W, Liang W J, Wei X. Soil nutrient characteristics of *Larix principis rupprechtii* plantations with different stand densities [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2019, 44(4): 84-92.

- [5] 孙佳瑞.不同耕作措施对黄土高原旱作农田土壤微生物及酶活性的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2014.
Sun J R. Impacts of different tillage measures on soil microorganism and enzymatic activity of dry farmland of the loess plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.
- [6] 罗维.长白山红松阔叶林土壤胞外酶活性对增氮减水的响应[D].哈尔滨:黑龙江大学,2018.
Luo W. Responses of soil extracellular enzyme activity to nitrogen increase and water reduction in *Korean pine broad-leaved* forest in Changbai Mountain[D]. Harbin: Helongjiang University, 2018.
- [7] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
Guan S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [8] Park J, Kim T, Moon M, et al. Effects of thinning intensities on tree water use, growth, and resultant water use efficiency of 50-year-old *Pinus koraiensis* forest over four years[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 408:121-128.
- [9] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报, 2018,29(3):732-738.
Sun Q H, Wu X, Wang M Z, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physico-chemical properties of *Pinus massoniana* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(3):732-738.
- [10] Zhou L L, Cai L P, He Z M, et al. Thinning increases understory diversity and biomass, and improves soil properties without decreasing growth of Chinese fir in Southern China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016,23(23):24135-24150.
- [11] Wang C Q, Xue L, Dong Y H, et al. Soil organic carbon fractions, C-cycling hydrolytic enzymes, and microbial carbon metabolism in Chinese fir plantations[J]. Science of the Total Environment, 2020,758:143695.
- [12] 范少辉,赵建诚,苏文会,等.不同密度毛竹林土壤质量综合评价[J].林业科学,2015,51(10):1-9.
Fan S H, Zhao J C, Su W H, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in *Phyllostachys edulis* stands of different stocking densities [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015,51(10):1-9.
- [13] 向玫.不同林分密度对云杉人工林生长及土壤理化性质的影响[J].安徽林业科技,2022,48(1):25-27.
Xiang M. Effects of stand densities on the growth and soil physicochemical properties of *Picea asperata* plantations[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2022,48(1):25-27.
- [14] 赵汝东,樊剑波,何园球,等.林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响[J].土壤,2012,44(2):297-301.
Zhao R D, Fan J B, He Y Q, et al. Effects of stand density on soil nutrients and enzyme activities in *Pinus massoniana* plantation[J]. Soils, 2012,44(2):297-301.
- [15] 章广琦,张萍,陈云明,等.黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J].生态学报,2018,38(4):1328-1336.
Zhang G Q, Zhang P, Chen Y M, et al. Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4):1328-1336.
- [16] 马亚峰,侯银,张焕朝.杨树不同林分密度和林分结构对土壤理化性质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(22):131-136.
Ma Y F, Hou Y, Zhang H C. Effects of different stand structures of poplar on soil physical and chemical properties[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(22):131-136.
- [17] 赵陟峰.半干旱黄土区不同密度刺槐林生态效益研究[D].北京:北京林业大学,2009.
Zhao Z F. Study on the ecological benefits of black locust plantation in hilly and gully regions on Loess Plateau of semi-arid area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [18] 韦景树,李宗善,冯晓珂,等.黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J].应用生态学报,2018,29(7):2433-2444.
Wei J S, Li Z S, Feng X Y, et al. Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau of China: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(7):2433-2444.
- [19] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[R]. Agriculture Publication, 2000,355-356.
- [20] 葛晓改.三峡库区马尾松林凋落物分解及对土壤碳库动态的影响研究[D].北京:中国林业科学研究院,2012.
Ge X G. The influence of litter decomposition on soil carbon pools dynamics of *Pinus Massoniana* stands in Three Gorges reservoir area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.
- [21] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响[J].生态学报, 2014,34(9):2228-2237.
Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, et al. Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(9):2228-2237.

- Jiang M L, Yang J W, Dai L Y, et al. Snow water equivalent 25 km daily product in China from 1980 to 2020 [DB/OL]. National Cryosphere Desert Data Center (www.ncdc.ac.cn), 2020. DOI: 10.12072/ncdc.I-SNOW.db0002.2020.
- [11] 何超.薄层黑土区降雨和汇流强度对顺坡垄作坡面水蚀过程的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
He C. Effects of rainfall intensity and inflow rate on hill-slope water erosion process under longitudinal ridge tillage in the thin layer black soil region of China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [12] Dass A, Chandra S, Choudhary A K, et al. Influence of field re-ponding pattern and plant spacing on rice root-shoot characteristics, yield, and water productivity of two modern cultivars under SRI management in Indian Mollisols[J]. Paddy and Water Environment, 2016,14(1):45-59.
- [13] 司志民,刘海洋,陈智,等.植被盖度和灌木带状配置对近地表风速廓线的影响[J].农机化研究,2016,38(10):178-182.
Si Z M, Liu H Y, Chen Z, et al. Effects of vegetation coverage and banded repair on near-surface wind velocity profile [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(10):178-182.
- [14] 梁会,田美荣,钱金平,等.基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(1):34-40.
Liang H, Tian M R, Qian J P, et al. Soil wind erosion characteristics and influence factors in Ningxia based on wind erosion model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):34-40.
- [15] 刘佳.东北黑土冻融作用机理与春季解冻期土壤侵蚀模拟研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011.
Liu J. Black soil freeze-thaw function mechanism and soil erosion simulation study in the spring thaw period [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011.
- [16] 华文杏,范昊明,许秀泉,等.东北坡耕地春季融雪侵蚀观测研究[J].水土保持学报,2017,31(2):92-96.
Hua W X, Fan H M, Xu X Q, et al. Observation on the spring snowmelt erosion of sloping farmland in Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):92-96.
- ~~~~~
- (上接第129页)
- [22] Lucas-Borja M E, Hedo J, Cerdá A, et al. Unravelling the importance of forest age stand and forest structure driving microbiological soil properties, enzymatic activities and soil nutrients content in Mediterranean Spanish black pine (*Pinus nigra* Ar. ssp. *salzmannii*) Forest[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562:145-154.
- [23] Enrique A G, Bruno C, Christopher A, et al. Effects of nitrogen availability on microbial activities, densities and functional diversities involved in the degradation of a Mediterranean evergreen oak litter (*Quercus ilex* L.) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(7):1654-1661.
- [24] 解梦怡,冯秀秀,马寰菲,等.秦岭锐齿栎林土壤酶活性与化学计量比变化特征及其影响因素[J].植物生态学报,2020,44(8):885-894.
Xie M Y, Feng X X, Ma H F, et al. Characteristics of soil enzyme activities and stoichiometry and its influencing factors in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020,44(8):885-894.
- [25] Chen H, Li D J, Xiao K C, et al. Soil microbial processes and resource limitation in Karst and non-Karst forests[J]. Functional Ecology, 2018,32(5):1400-1409.
- [26] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(5):937-944.
- [27] Thompson J, Brokaw N, Zimmerman J K, et al. Land use history, environment, and tree composition in a tropical forest[J]. Ecological Applications, 2002,12(5):1344.
- [28] Domeignoz-Horta L A, Pold G, Liu X J A, et al. Microbial diversity drives carbon use efficiency in a model soil [J]. Nature Communications, 2020,11(1):3684.
- [29] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,116:11-21.
- [30] 刘冰燕,陈云明,曹扬.渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2016,31(1):1-6,14.
Liu B Y, Chen Y M, Cao Y. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation in Weibei Loess Plateau Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(1):1-6,14.