

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.037.

朱燕, 翟博超, 孙美美, 等. 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 160-167.

Zhu Yan, Zhai Bochao, Sun Meimei, et al. Soil Physicochemical Properties and Stoichiometry Characteristics in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* Plantations Across Different Densities in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 160-167.

## 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林 土壤理化性质与化学计量特征

朱燕<sup>1</sup>, 翟博超<sup>2</sup>, 孙美美<sup>2</sup>, 罗伶书<sup>3</sup>, 王瑛<sup>3</sup>, 杜盛<sup>2,3</sup>

(1.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探明黄土丘陵区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林土壤理化性质及化学计量特征对林分密度的响应特征, 为黄土丘陵地区人工林经营提供科学依据。[方法] 试验测定分析两种人工林土壤容重、含水量、土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量, 利用单因素方差分析方法, 开展各指标随不同密度梯度的变化特征及垂直变化特征研究, 利用多因素相关分析方法分析了各指标间的相关关系。[结果] (1) 在垂直分布特征上, 各林分 SOC 和 TN 含量都呈现随土层深度增加而显著减小的趋势; 土壤容重和 TP 含量无明显规律且无显著差异。(2) 刺槐林密度对土壤容重、含水量、N:P 等指标影响不显著; 低密度刺槐林的 SOC、TN、TP、C:N 均显著高于其他密度刺槐林。(3) 油松林密度对土壤容重、C:N、C:P、N:P 等指标影响不显著; 高密度油松林的 SOC、TN、TP 含量显著高于其他密度油松林。(4) 同一密度下, 刺槐林的土壤容重、含水量大于油松林; SOC、TN、C:N、C:P、N:P 均低于油松林, 除 C:N 外, 差异均显著。[结论] 低密度刺槐林的 SOC、TN、TP 含量较高, 而高密度油松林的 SOC、TN、TP 含量较高, 且油松林的土壤质量相对优于刺槐林。

**关键词:** 黄土丘陵区; 刺槐; 油松; 人工林; 土壤理化性质

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0160-08

## Soil Physicochemical Properties and Stoichiometry Characteristics in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* Plantations Across Different Densities in the Loess Hilly Region

Zhu Yan<sup>1</sup>, Zhai Bochao<sup>2</sup>, Sun Meimei<sup>2</sup>, Luo Lingshu<sup>3</sup>, Wang Ying<sup>3</sup>, Du Sheng<sup>2,3</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. 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 explore the response characteristics of soil physical and chemical properties and stoichiometric characteristics to stand density of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantations in loess hilly region, and to provide scientific basis for plantation management in loess hilly region. [Methods] The soil bulk density, water content, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents of two plantations were measured and analyzed. The variation characteristics and vertical variation characteristics of each index with different density gradients were studied by single factor variance analysis method, and the correlation between each index was analyzed by multi-

收稿日期: 2022-07-27

修回日期: 2022-09-18

资助项目: 中国科学院野外站联盟课题(KFJ-SW-YW034-03); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA05050202)

第一作者: 朱燕(1994—), 女, 甘肃酒泉人, 硕士研究生, 研究方向为植被恢复与森林生态系统过程。E-mail: 2627046190@qq.com

通信作者: 杜盛(1965—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与森林生态系统过程研究。E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

factor correlation analysis method. [Results] (1) In the vertical distribution characteristics, the SOC and TN contents of each stand showed a significant decreasing trend with the increase of soil depth. There was no significant difference in soil bulk density and TP content. (2) *Robinia pseudoacacia* forest density had no significant effect on soil bulk density, water content, N : P and other indicators. SOC, TN, TP and C : N of low density *Robinia pseudoacacia* forest were significantly higher than those of other densities. (3) *Pinus tabulaeformis* forest density had no significant effect on soil bulk density, C : N, C : P, N : P and other indicators. The contents of SOC, TN and TP in high density pine forest were significantly higher than those in other density pine forest. (4) Under the same density, the soil bulk density and water content of *Robinia pseudoacacia* forest were higher than those of *Pinus tabulaeformis* forest. The SOC, TN, C : N, C : P, N : P were lower than those of *Pinus tabulaeformis* forest, except for C : N, the differences were significant. [Conclusion] The contents of SOC, TN and TP in low-density *Robinia pseudoacacia* forest were higher, while the contents of SOC, TN and TP in high-density *Pinus tabulaeformis* forest were higher, and the soil quality of *Pinus tabulaeformis* forest was relatively better than that of *Robinia pseudoacacia* forest.

**Keywords:** loess hilly; *Robinia pseudoacacia*; *Pinus tabuliformis*; plantation forest; soil physicochemical properties

森林土壤作为森林生态系统水分养分循环的重要载体,为林木提供生长所必需的水分和矿物质,具有重要的生态功能<sup>[1]</sup>。土壤质量的优劣受立地条件、环境因素和土壤理化性质等共同影响<sup>[2]</sup>。土壤理化性质已成为评价土壤质量和肥力的基础指标,对于林木生长发育具有重要影响<sup>[3]</sup>。

林分密度会对林下小环境、灌草的多样性以及凋落物储存和分解速度产生影响,并进一步作用于林下土壤,改变土壤的理化性质<sup>[4]</sup>。合理的林分密度有助于人工林结构优化,使其逐步向天然林群落演替。董威等<sup>[5]</sup>研究发现,油松(*Robinia pseudoacacia*)土壤含水量、全碳和全磷随林分密度变化呈先增后减的趋势,但土壤理化性质的垂直分布格局不受林分密度影响。王凯等<sup>[6]</sup>发现,林分密度对樟子松人工林土壤有机碳、全氮、全磷和 C : N 随林分密度变化呈先增后减趋势,对土壤理化性质的垂直分布格局影响较小。可以看出林分密度对不同林型的土壤理化性质影响具有普遍性和特异性。目前研究多集中于单一林分的不同密度对土壤理化性质特征的影响上,而对于多种林分类型下的林分密度等经营管理措施对土壤性质的影响以及碳、氮、磷等元素在森林生态系统中的循环与平衡和各元素间的耦合关系的研究相对较少。因此,需要对不同人工林在不同密度下土壤理化性质的垂直和水平地带性特征以及植被与土壤之间的相互作用和机理进行更深入的探讨研究。

黄土丘陵区地处季节性干旱生态脆弱地带,水土流失严重,生态环境脆弱。作为水土保持和植被恢复的重要措施,多年来营造了大面积的人工林。刺槐

(*Pinus tabuliformis*)具有速生性好、易繁殖、耐旱、耐贫瘠等特点;油松作为中国特有树种,是华北地区代表性针叶林类型<sup>[7]</sup>,都是黄土丘陵区主要的造林树种<sup>[5]</sup>。为探明该区域人工林与水土资源的耦合关系,为提高植被恢复效益和生态系统的稳定性提供理论支撑,本研究选择黄土丘陵区刺槐林和油松林的土壤理化性质对林分密度和林分类型的响应展开研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市宝塔区南部和甘泉县北部(109°16′—109°33′E, 36°9′—36°29′N),年均气温为 10.0℃,年均降雨量为 537.9 mm<sup>[8]</sup>,属于温带半干旱气候区,海拔高度范围为 1 150~1 295 m。该区位于森林—森林草原过渡带,地貌类型属于黄土丘陵沟壑区,土壤类型以黄绵土为主。研究区的刺槐林、油松林样地为人工纯林,乔木层树种单一,林下灌木丛和草本生长稀疏。刺槐林林下草本主要有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)等;油松林林下灌木有陕西莢蒾(*Viburnum schensianum*)等,草本植物主要有委陵菜(*Potentilla chinensis*)、铁杆蒿等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 选择研究区内典型的油松林和刺槐林作为研究对象,设置立地条件大致相同且具有一定代表性的样地,每种林型划分为 3 个密度梯度,每个密度梯度设置 2 块样地,样地规格均为 20 m×20 m。样地基本信息见表 1。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sampling area

树种	密度划分	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	坡度/ (°)	坡向	林龄/a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	海拔/m
刺槐	R <sub>I</sub>	2130,2315	16~22	西北	17	8.1	8.05	1290
	R <sub>II</sub>	2577,2745	14~17	东南	19	7.8	7.15	1287
	R <sub>III</sub>	3133,3558	13~21	东南	19	8.2	7.65	1220
油松	P <sub>I</sub>	1916,2405	17~20	东北	36	21.1	13.6	1171
	P <sub>II</sub>	2453,2642	22~23	东北	40	12.2	9.4	1222
	P <sub>III</sub>	3137,3320	17~21	东北	36	14.4	12.55	1171

1.2.2 样品采集与测定 为便于比较,选择2018年3月非生长季较为稳定的时间段集中采集土样。在每个样地内对角线上设置3个重复的土壤剖面,分为(0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—100 cm)土层采集土样。土样采集主要分两部分,一部分利用环刀取各土层的原状土,用于测定土壤容重和含水量指标;另一部分是将土壤中的植物、细根、石块挑出后,同一土层样品按质量比例混匀,在阴凉处自然风干,过0.15 mm的土筛,用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量。

土壤容重采用环刀法测定,土壤含水量采用烘干法测定,SOC采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定,TN采用凯氏定氮酸溶法测定,TP采用钼蓝比色法测定。

1.2.3 数据处理 采用Excel对野外调查和室内试验所得数据进行初期整理,其中0—100 cm土层数据通过各土层数据加权平均计算得出,权重为对应的土层深度。采用SPSS 22.0软件对试验数据统计分析,LSD法对土壤理化性质及化学计量比进行平均数差异显著性分析及事后检验。相关绘图由Origin和R4.1.0软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤物理性质特征

刺槐林土壤容重随土层深度和林分密度变化差异均不显著( $p>0.05$ )。土壤含水量随土层深度的增大呈先增加后降低的趋势,且20—40 cm土层含水量明显高于其他土层。0—100 cm土层的平均土壤含水量随着林分密度增加呈现先降低后增加趋势,且R<sub>III</sub>的土壤含水量高于R<sub>I</sub>,R<sub>II</sub>(图1)。

油松林的土壤容重随土层深度变化无明显规律且无显著性差异( $p>0.05$ ),但低密度油松林的表层土壤容重显著小于其他密度( $p<0.05$ )。油松林土壤含水量随土层深度的增大先增加后降低,20—40 cm土层含水量明显高于其他土层。0—100 cm土层的平均土壤含水量则随着密度增加逐渐降低,且P<sub>I</sub>的

土壤含水量显著高于P<sub>II</sub>,P<sub>III</sub>( $p<0.05$ )。

刺槐林0—40 cm土层的容重显著高于油松林( $p<0.05$ ),增幅分别为1.91%~20.38%和0.91%~7.77%,说明林龄较大的油松林对于降低土壤容重作用明显,整体上改善了土壤质地。刺槐林0—100 cm土层的平均土壤含水量显著高于油松林( $p<0.05$ ),增幅分别为8.09%,11.54%,20.77%,应该与刺槐林均为幼龄林有关。

### 2.2 土壤化学性质及其计量比特征

2.2.1 林地土壤化学性质对密度的响应特征 刺槐和油松林的SOC和TN含量均随土层深度增加而显著降低,但TP含量无明显的垂直变化规律(图2)。刺槐林0—20 cm土层的SOC和TN含量在0—100 cm土层中的贡献率分别为58.62%,60.69%,58.91%和58.64%,59.76%,55.75%;油松林0—20 cm土层的SOC和TN含量在0—100 cm土层中的贡献率分别为65.97%,70.13%,65.89%和63.79%,65.59%,61.46%。

刺槐林0—100 cm土层SOC平均含量随林分密度的增加而降低,R<sub>I</sub>密度显著高于其他密度( $p<0.05$ ),增幅分别达32.05%,37.17%;0—100 cm土层TN,TP平均含量均随密度增加先降低后略有增加,R<sub>I</sub>密度显著高于其他密度( $p<0.05$ ),增幅分别达12.17%~15.44%和7.86%~8.18%。

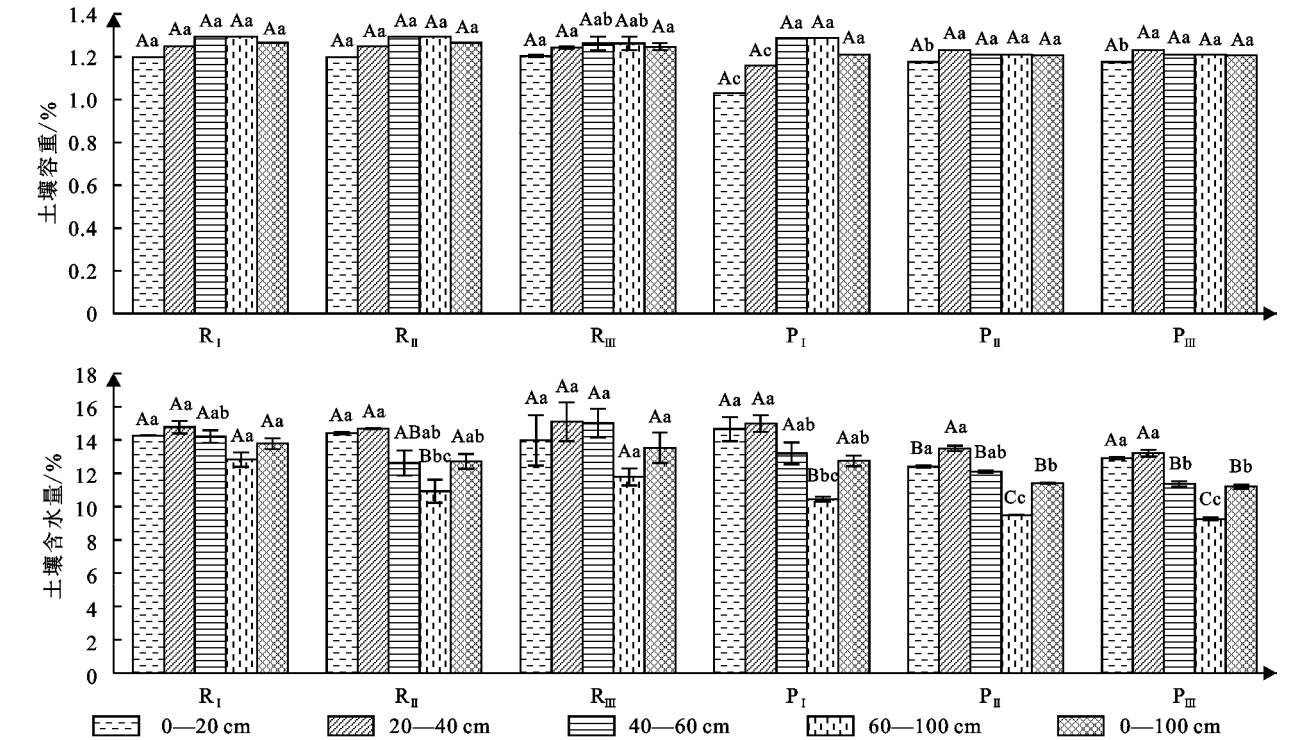
油松林0—100 cm土层的SOC,TN和TP平均含量均随密度增加呈现先降低后增加的趋势,且P<sub>III</sub>均显著高于P<sub>I</sub>和P<sub>II</sub>( $p<0.05$ ),增幅分别达到18.98%~28.80%,12.91%~17.47%,19.49%~27.15%

油松林SOC和TN平均含量总体上均显著高于刺槐林( $p<0.05$ );TP含量在两林分间差异不显著( $p>0.05$ )。

2.2.2 刺槐和油松林生态化学计量比变化特征 不同密度刺槐林和油松林在0—100 cm土层的土壤C:N变化范围为4.40~6.13;C:P变化范围为2.59~5.59;N:P变化范围在0.57~0.95。刺槐林C:N大小依次为R<sub>I</sub>>R<sub>II</sub>>R<sub>III</sub>,C:P依次为R<sub>I</sub>>R<sub>II</sub>>



$R_{III}$ , N : P 依次为  $R_I > R_{II} > R_{III}$ ; 油松林 C : N 大小 : P 依次为  $P_{II} > P_I > P_{III}$ 。刺槐林各土层的 C : N, 依次为  $P_{III} > P_I > P_{II}$ , C : P 依次为  $P_{III} > P_I > P_{II}$ , N C : P, N : P 均显著小于油松林(图 3)。



注:不同大写字母表示同林分不同土层间差异显著( $p<0.05$ ),不同小写字母表示同土层不同林分之间差异显著( $p<0.05$ );0—100 cm 土层中不同大写字母表示各自林分内不同密度间的差异显著性,不同小写字母表示两林分之间的差异显著性。下同。

图 1 林地土壤容重和含水量特征

Fig. 1 Characteristics of soil bulk density and moisture content in plantations

2.3 土壤理化性质相关性分析

对刺槐和油松人工林在不同密度下的土壤理化性质结果进行相关性分析得出,土壤容重与 SOC, TN, C : P, N : P 之间呈极显著负相关( $p<0.001$ ); SOC 和 TN 与 C : N, C : P, N : P 之间呈极显著正相关( $p<0.001$ ),与 TP 含量呈显著正相关( $p<0.05$ )(表 2)。

3 讨论

3.1 土壤理化性质特征

土壤理化性质受土壤发育过程影响,植被年限增加和有机质积累都具有改善土壤质地的作用。本研究表明,刺槐和油松人工林的土壤理化性质垂直分布具有明显差异,而总体上各指标呈表聚性和波动性。两林分 0—40 cm 土层的土壤含水量, SOC, TN, C : P, N : P 等指标均大于深层土壤,与王岩松等<sup>[9]</sup>的研究结果相似,这与土壤表层的有机质补充相关联,植物和土壤之间的交互作用主要集中在表层土壤中,有利于土壤养分的截留和积累<sup>[10]</sup>。两林分 0—20 cm 表层土壤容重均低于其他土层土壤。谭学进等<sup>[11]</sup>研究发现,植被对土壤物理性质的影响在垂直方向上逐渐减弱。说明刺槐和油松对表层土壤容重

的改善作用更为明显。

不同林分类型的土壤所表现的理化特征有所差异。本研究对比分析了刺槐和油松人工林的土壤理化性质发现,刺槐人工林 0—40 cm 土层容重显著大于油松人工林( $p<0.05$ ),与隋聚艳等<sup>[12]</sup>的研究结果一致,说明油松人工林对于降低土壤容重作用较刺槐人工林明显,整体上改善了土壤质地。刺槐人工林土壤平均含水量略高于油松林,与常译方等<sup>[13]</sup>对晋西黄土区刺槐林和油松林的研究结果一致,这除了林地立地条件的影响外,应该还存在两方面原因,一方面是刺槐树种叶片面积较大,冠层较强的降雨截留能力影响了降水的再分配过程<sup>[14]</sup>;另一方面是刺槐林均为幼龄林而油松林林龄较大的原因。另外,刺槐林 SOC, TN 平均含量均显著低于油松林( $p<0.01$ ),与章广琦等<sup>[15]</sup>的研究结果相似,可能是土壤有机物质积累及积累年限综合作用的结果<sup>[16]</sup>。

作为衡量土壤质量的重要参数,不同的计量比表征的土壤特性有所不同。研究区土壤 C : N, C : P 平均值远小于全国平均值(10~12, 61)<sup>[17]</sup>,与温晨等<sup>[18]</sup>的研究结果一致,说明研究区土壤有机质矿化作用较快,不利于土壤有机质积累,且土壤 P 有效性

较高,土壤微生物受P的限制作用较小。另外,土壤满足  $C:N < 30$ ,  $N:P < 14$  条件,同时  $N:P$  远低于

中国陆地平均水平(9.3)<sup>[17]</sup>,表明研究区植物生长主要受土壤N限制。

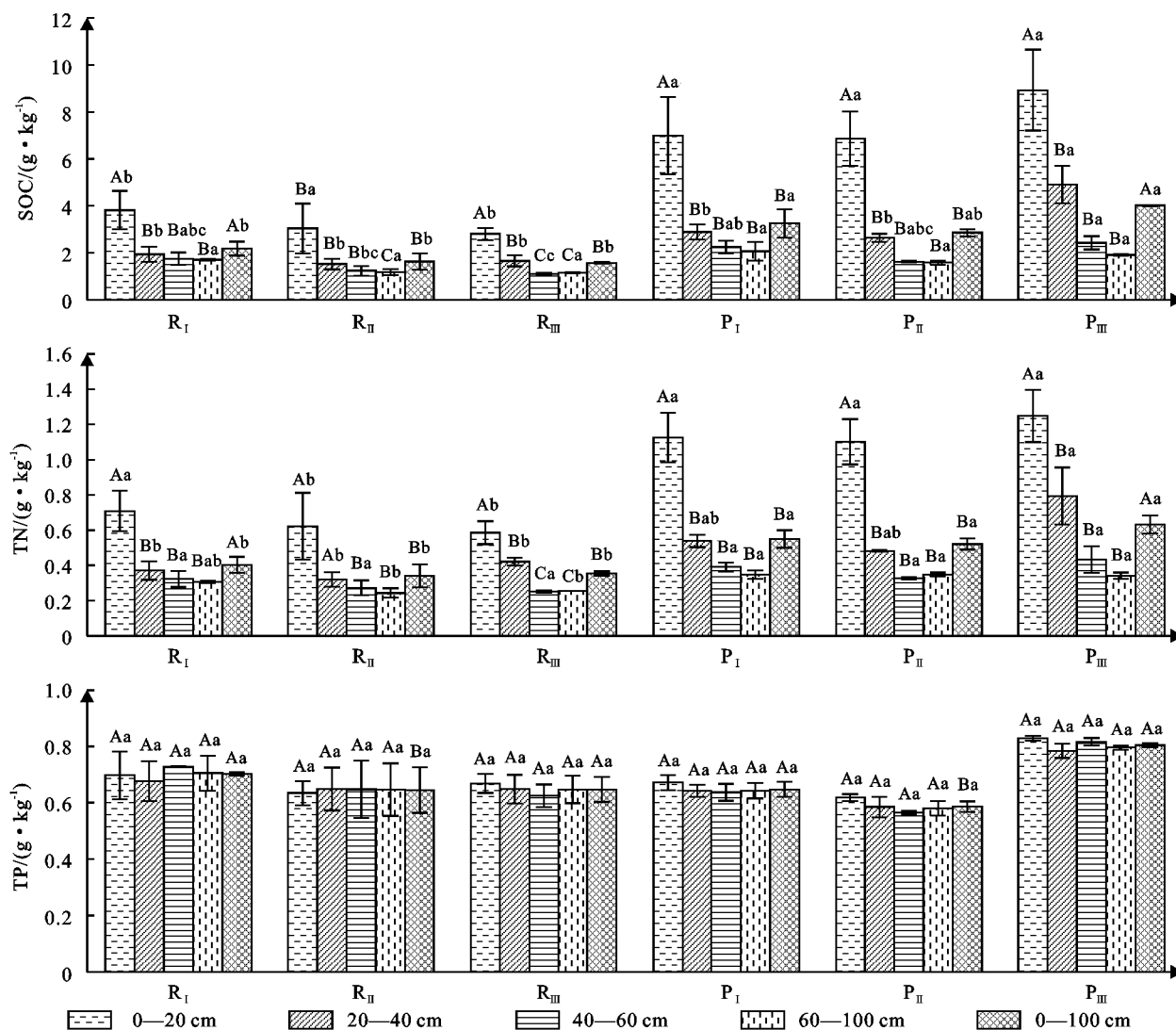


图2 林地土壤养分特征

Fig. 2 Soil nutrient characteristics of plantations

本研究相关性分析表明,黄土丘陵区 0—100 cm 土层的土壤理化性质及化学计量比在空间分布上具有良好的耦合关系<sup>[19]</sup>。其中,土壤养分各指标之间呈正相关关系,SOC 和 TN 之间的相关系数最高,说明这二者之间的关系最为密切。土壤容重和 SOC, TN 含量之间呈负相关关系,可能是与森林的土壤发育有关。在森林发育过程中,凋落物的分解引起 C, N 元素积累的同时,会导致土壤疏松多孔,进而降低土壤容重,增加土壤孔隙度,提高土壤的通透性能<sup>[20]</sup>。这与张昊等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

### 3.2 土壤理化性质对林分密度的响应

林分密度不仅决定林木个体获取土壤养分水分等资源的平均水平,而且可通过冠层对水分和光照的调控来改变森林温度、林内通风透光条件、根系发育及酶活性,进而影响枯落物积累和分解速率,使得土

壤养分含量存在差异<sup>[22]</sup>。

刺槐和油松人工林在不同的密度范围内,土壤的物理性质和化学性质均呈现出一定的异质性<sup>[5]</sup>。本研究中,刺槐林的 SOC, TN, TP 等养分含量均在低密度时最大,与王岩松等<sup>[9]</sup>对晋西不同密度刺槐林研究一致。原因可能是刺槐人工林随林分密度增加过程中对土壤养分的需求逐渐大于刺槐树种对土壤养分的改善能力,出现刺槐及其林下植被争夺养分及其生存空间的现象;也可能是因为密度的增加,导致刺槐人工林土壤干化现象加剧,植被生长受限,凋落物减少,养分含量也随之下降<sup>[23]</sup>。潘复静等<sup>[24]</sup>对不同密度马尾松林的土壤性质研究表明,高密度马尾松林的 SOC 和铵态氮含量显著高于低密度。王岩松等<sup>[9]</sup>认为高密度油松林的 SOC 和 TN 含量高于其他密度。与本研究高密度油松林 SOC, TN, TP 含量

高于其他密度的结果相似。在针叶树人工林中,乔木层树种单一且其凋落物分解速度较慢,林下灌草层对土壤养分贡献更为重要<sup>[25]</sup>。但针叶树对光照的竞争相对较小,高密度下乔木层对林下植被生长限制不强;另外,油松林在高密度时可能存在地表蒸腾作用减弱和林木凋落物量增加的综合作用,使得土壤养

分含量的累积程度大于林木对养分的消耗程度<sup>[26]</sup>。另外,两林分 TP 含量随密度变化差异均不显著( $p>0.05$ ),这一结果与赵汝东等<sup>[27]</sup>对马尾松林的研究结果一致。原因可能是 TP 作为一种沉积性元素,其含量主要受土壤母质影响<sup>[28]</sup>,分布较为均匀且不易受环境影响。

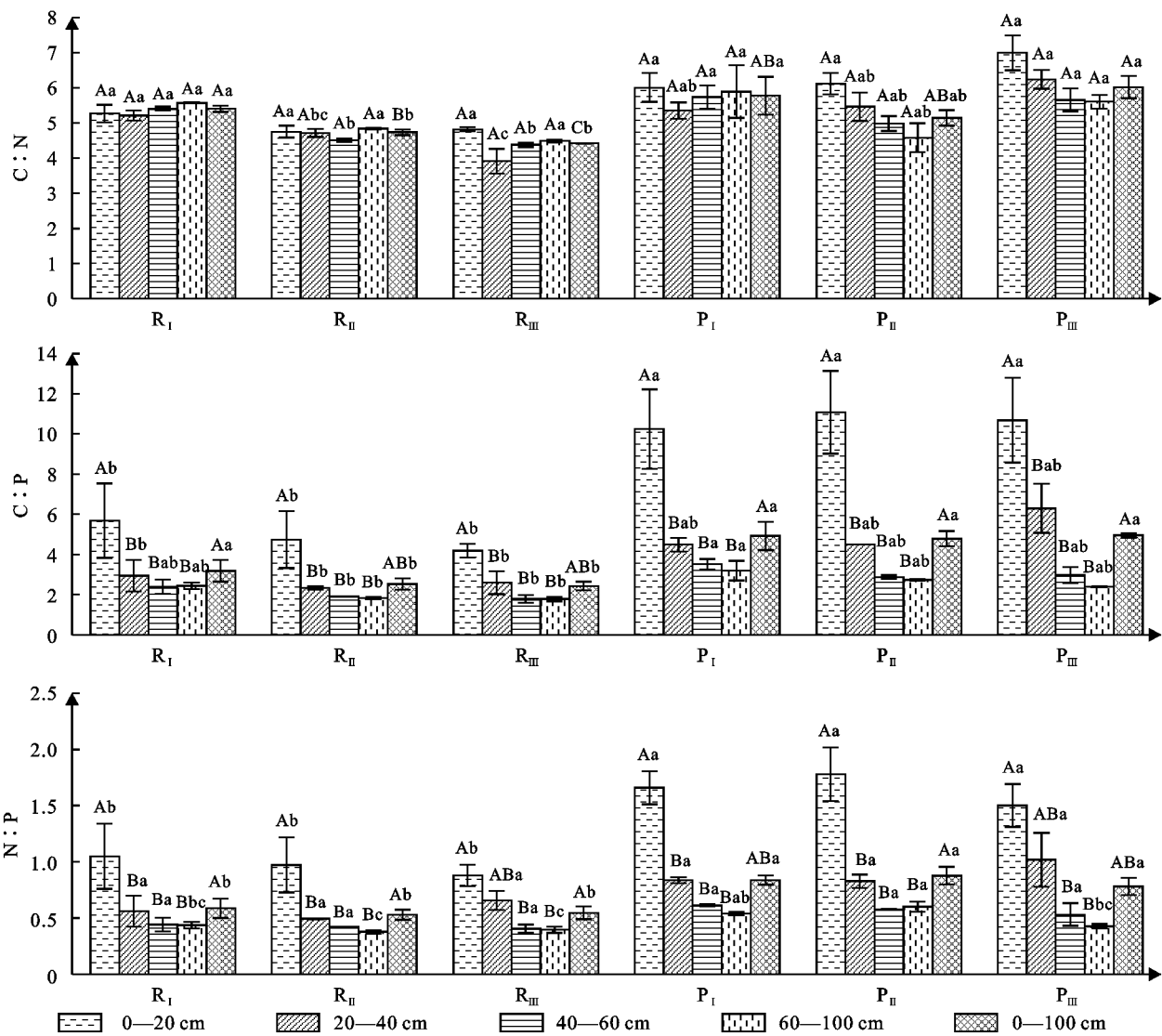


图 3 林地土壤化学计量比特征

Fig. 3 Soil stoichiometric characteristics of plantations

表 2 土壤理化性质相关性分析

Table 2 Correlation relationship of soil physicochemical properties

指标	土壤容重	土壤含水量	SOC	TN	TP	C : N	C : P
土壤含水量	−0.2313						
SOC	−0.8775***	−0.3203					
TN	−0.8961***	−0.3678	0.9013***				
TP	−0.0377	−0.0259	0.5426*	0.35			
C : N	−0.5693*	−0.2443	0.9457***	0.8971***	0.8706***		
C : P	−0.4721	−0.3458	0.8674***	0.9124***	0.1875	0.8973***	
N : P	−0.5245	−0.3874	0.8506***	0.8913***	−0.0284	0.7311**	0.9325***

注: \* 表示  $p<0.05$ , \*\* 表示  $p<0.01$ , \*\*\* 表示  $p<0.001$ 。参与分析的数据包括 12 块样地中各项指标的平均值。

## 4 结论

对不同密度下刺槐和油松人工林土壤理化性质综合分析结果表明,林分密度和林分类型对土壤理化性质影响不同。两林分表层土壤容重小于深层土壤,SOC和TN等养分指标在垂直方向上存在明显的“表聚效应”,均对表层土壤理化性质的改善作用更明显。低密度刺槐林的SOC,TN,TP,C:N等土壤养分指标、受氮素的限制等方面较优;而油松林则是中高密度时较优。刺槐和油松两林分类型间的土壤理化指标表现不同,刺槐林的土壤容重、含水量大于油松林,而SOC,TN,C:N,C:P,N:P等养分指标均低于油松林。

### 参考文献:

- [1] 周润惠,苏天成,喻静,等.碧峰峡常绿阔叶林不同群落物种多样性和土壤理化性质[J].生态学杂志,2022,41(1):1-8.  
Zhou R H, Su T C, Yu J, et al. Species diversity and soil physicochemical properties of different communities in Bifeng Gorge evergreen broad-leaved forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(1):1-8.
- [2] 鲁顺保,周小奇,芮亦超,等.森林类型对土壤有机质、微生物生物量及酶活性的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2567-2573.  
Lu S B, Zhou X Q, Rui Y C, et al. Effects of forest type on soil organic matter, microbial biomass and enzyme activity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(10):2567-2573.
- [3] 罗旭鹏,张锦梅,马文斌,等.青海高原油松林地土壤理化性质差异性及对油松长势影响[J].青海农林科技,2021(4):92-98.  
Luo X P, Zhang J M, Ma W B, et al. The differences of soil physical and chemical properties and their effects on the growth of *Pinus tabulaeformis* in Qinghai Plateau [J]. Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology, 2021(4):92-98.
- [4] 王媚臻,毕浩杰,金锁,等.林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(3):981-988.  
Wang M Z, Bi H J, Jin S, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physical and chemical properties of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain[J]. Ecology, 2019,39(3):981-988.
- [5] 董威,刘泰瑞,覃志杰,等.不同林分密度油松天然林土壤理化性质及微生物量碳氮特征研究[J].生态环境学报,2019,28(1):65-72.  
Dong W, Liu T R, Qin Z J, et al. Study on soil physical and chemical properties and microbial biomass carbon and nitrogen characteristics of natural *Pinus tabulaeformis* forest with different stand densities [J]. Journal of Ecological Environment, 2019,28(1):65-72.
- [6] 王凯,赵成姣,张日升,等.不同密度樟子松人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J].生态学杂志,2020,39(3):741-748.  
Wang K, Zhao C J, Zhang R S, et al. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in *sylvestris pine* artificial forest with different densities [J]. Journal of Ecology, 2020,39(3):741-748.
- [7] 刘帅楠,李广,吴江琪,等.黄土丘陵区不同土地类型下土壤养分特征:基于生态化学计量学[J].草业学报,2021,30(3):200-207.  
Liu S N, Li G, Wu J Q, et al. Soil nutrient characteristics under different land types in loess hilly region: Based on ecological stoichiometry [J]. Pratacultural Journal, 2021,30(3):200-207.
- [8] Sun M M, Zhai B C, Chen Q W, et al. Response of density-related fine root production to soil and leaf traits in coniferous and broad-leaved plantations in the semiarid loess hilly region of China [J]. Journal of Forestry Research, 2022,33(3):1071-1082.
- [9] 王岩松,马保明,高海平,等.晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J].北京林业大学学报,2020,42(8):81-93.  
Wang Y S, Ma B M, Gao H P, et al. Responses of soil nutrients and stoichiometric ratios of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantations to stand density in the loess area of western Shanxi[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020,42(8):81-93.
- [10] 兰道云,毕华兴,赵丹阳,等.晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价[J].水土保持学报,2022,36(2):189-196.  
Lan D Y, Bi H X, Zhao D Y, et al. Evaluation of soil conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities in loess area of western Shanxi[J]. Soil and Water Conservation Journal, 2022, 36(2):189-196.
- [11] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.  
Tan X J, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in loess area [J]. Environmental Sciences of China, 2019,39(2):713-722.
- [12] 隋聚艳,王建文.黄土丘陵区3种典型林地土壤持水能力研究[J].人民黄河,2021,43(7):114-119.  
Sui J Y, Wang J W. Soil water holding capacity of three typical forest lands in loess hilly region [J]. People's Yellow River, 2021,43(7):114-119.
- [13] 常译方,毕华兴,高路博,等.晋西黄土区刺槐和油松林地土壤水分动态变化[J].中国水土保持科学,2014,12(4):21-27.  
Chang Y F, Bi H X, Gao L B, et al. Dynamic changes of soil moisture in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus*



- tabulaeformis* forests in loess area of western Shanxi [J]. China Soil and Water Conservation Science, 2014, 12(4):21-27.
- [14] 熊瑛楠,冯天骄,王平,等.晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J].水土保持学报, 2022,36(2):228-237,246.
- Xiong Y G, Feng T J, Wang P, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient properties in the loess area of western Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):228-237,246.
- [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. Ecological stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystems in loess hilly region[J]. Ecology, 2018,38(4):1328-1336.
- [16] Song B L, Yan M J, Du S, et al. Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semi-arid region of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016,143:159-166.
- [17] Tian H, Chen G, Chi Z, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010,98(1/3):139-151.
- [18] 温晨,杨智姣,杨磊,等.半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2021,41(5):1824-1834.
- Wen C, Yang Z J, Yang L, et al. Ecological stoichiometric characteristics of different vegetation types and soil in semi-arid loess watershed[J]. Ecology, 2021,41(5):1824-1834.
- [19] 高海宁,李彩霞,孙小妹,等.祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):219-227.
- Gao H N, Li C X, Sun X M, et al. Soil stoichiometric characteristics at different altitudes in the northern foot of Qilian Mountains[J]. China Desert, 2021,41(1):219-227.
- [20] 刘小林,郑子龙,蔺岩雄,等.甘肃小陇山林区主要林分类型土壤水分物理性质研究[J].西北林学院学报, 2013,28(1):7-11.
- Liu X L, Zheng Z L, Lin Y X, et al. Study on soil water physical properties of main forest types in Xiaolongshan forest region of Gansu Province[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2013,28(1):7-11.
- [21] 张昊,李建平,王誉陶,等.封育与放牧对黄土高原天然草地土壤化学计量特征的影响[J].水土保持学报, 2020,34(5):251-258.
- Zhang H, Li J P, Wang Y T, et al. Effects of fencing and grazing on soil stoichiometric characteristics of natural grassland in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(5):251-258.
- [22] 吕金林,闫美杰,宋变兰,等.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J].生态学报, 2017,37(10):3385-3393.
- Lü J L, Yan M M, Song B L, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in *Robinia pseudoacacia* and *Quercus liaotungensis* forests in loess hilly region[J]. Ecology, 2017,37(10):3385-3393.
- [23] 刘晨峰,尹婧,贺康宁.林下植被对半干旱区不同密度刺槐林地土壤水分环境的指示作用[J].中国水土保持科学,2004(2):62-67,79.
- Liu C F, Yin J, He K N. Indicative effect of understory vegetation on soil water environment of different density of *Robinia pseudoacacia* forest in semi-arid area[J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2004(2):62-67,79.
- [24] 潘复静,陈英倩,梁月明,等.种植密度对马尾松人工林土壤磷转化功能微生物与细菌群落结构的影响[J].生态学杂志,2021,40(5):1233-1243.
- Pan F J, Chen Y Q, Liang Y M, et al. Effects of planting density on soil phosphorus transformation functional microorganisms and bacterial community structure in *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Ecology, 2021,40(5):1233-1243.
- [25] 李国雷,刘勇,于海群,等.油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林林下植被发育对油松生长节律的响应[J].生态学报,2009,29(3):1264-1275.
- Li G L, Liu Y, Yu H Q, et al. Response of understory vegetation development to growth rhythm of *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Ecology, 2009,29(3):1264-1275.
- [26] 郭敬丽,崔立志,赵会艳,等.林分密度对人工油松林林下植物多样性的影响[J].林业与生态科学,2018,33(3):275-280.
- Guo J L, Cui L Z, Zhao H Y, et al. Effects of stand density on understory plant diversity in artificial *Pinus tabulaeformis* forest [J]. Forestry and Ecological Sciences, 2018,33(3):275-280.
- [27] 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 under *Pinus massoniana* forest[J]. Soil, 2012,44(2):297-301.
- [28] 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. Ecological stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in *Robinia pseudoacacia* plantation in Weibei loess area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(1):1-6,14.