

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240188

晋西黄土区油松林土壤碳氮磷计量特征对 林龄和密度的响应

杨周¹ 张建军^{1,2} 赵炯昌¹ 胡亚伟¹ 李阳¹ 王勃¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083)

摘要:【目的】分析油松林土壤碳(C)氮(N)磷(P)计量特征对林龄和密度的响应,旨在探究不同林龄条件下密度对土壤化学计量的影响规律,为油松人工林可持续经营提供科学依据。【方法】以晋西黄土区蔡家川流域内3种林龄(30、40、50 a)和3种密度(1 000~1 500株/hm²、2 500~3 000株/hm²、4 000~4 500株/hm²)的油松人工林为研究对象,测定并分析0~100 cm土壤化学计量特征。【结果】(1)林龄和密度的双因素交互作用对土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、C:N、C:P、N:P影响显著($P < 0.05$)。(2)林龄对不同密度油松林土壤TN、SOC和化学计量比有不同影响,高密度林分中,在林龄增长至50 a时,表层土壤肥力指标出现明显衰退趋势;林龄较高时,低密度的林分土壤养分较高。(3)土壤TN与TP、SOC、C:P、N:P均呈显著正相关($P < 0.05$),SOC与C:N、C:P、N:P均有极显著正相关关系($P < 0.01$),C、N元素对林分生长指标有显著影响($P < 0.05$)。【结论】在黄土区应根据不同林龄阶段合理调节林分密度,30 a的油松林适宜密度为4 000株/hm²,40 a时密度应调整至2 500~3 000株/hm²,50 a的油松密度为1 000~1 500株/hm²时土壤养分最优。适宜的林分密度可以保证林地土壤养分状况维持在最优状态,有利于人工林现阶段可持续经营以及后续土壤保育功能的持续发挥。

关键词: 土壤化学计量特征; 林龄; 林分密度; 油松人工林; 晋西黄土区

中图分类号: S791.254; S714.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)12-0030-11

引文格式: 杨周,张建军,赵炯昌,等.晋西黄土区油松林土壤碳氮磷计量特征对林龄和密度的响应[J].北京林业大学学报,2024,46(12):30-40. Yang Zhou, Zhang Jianjun, Zhao Jiongchang, et al. Response of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* forests to stand age and density in the Loess Plateau region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 30-40.

Response of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* forests to stand age and density in the Loess Plateau region of western Shanxi Province, northern China

Yang Zhou¹ Zhang Jianjun^{1,2} Zhao Jiongchang¹ Hu Yawei¹ Li Yang¹ Wang Bo¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Chinese National Ecosystem

Research Network, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Analyzing the responses of soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) stoichiometry to stand age and density in *Pinus tabulaeformis* forest land can provide scientific evidence for sustainable management of *Pinus tabulaeformis* plantations. [Method] This study focused on *Pinus tabulaeformis* plantations of three stand ages (30, 40 and 50 years) and three densities (1 000–1 500 tree/ha, 2 500–3 000 tree/ha, 4 000–4 500 tree/ha) in the Caijiachuan Watershed, western Shanxi Province of

收稿日期: 2024-06-11 修回日期: 2024-08-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF130040103)。

第一作者: 杨周。主要研究方向: 林业生态工程。Email: 2754914084@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号水土保持学院。

责任作者: 张建军, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林水文、林业生态工程。Email: zhangjianjun@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

northern China. Soil C, N, and P contents and their stoichiometric ratios were measured and analyzed from 0 to 100 cm depth layer. [Result] The two-factor interaction of stand age and density showed a significant influence on SOC, total N (TN), C:N, C:P, and N:P ($P < 0.05$). (2) Stand age had different effects on soil TN, SOC, and chemical stoichiometric ratios in stands of different densities, plantations with high density exhibited soil fertility decline at 50 years. Older plantations indicate that lower stand density is associated with higher soil nutrient levels. (3) Soil TN was significantly positively correlated with TP, SOC, C:P, and N:P ($P < 0.05$); SOC was significantly positively correlated with C:N, C:P, and N:P ($P < 0.01$). C and N elements had a significant impact on soil chemical stoichiometry and stand growth ($P < 0.05$). [Conclusion] In loess area, it is necessary to rationally adjust stand density according to different *Pinus tabuliformis* stand ages. For a 30-year-old stand, the recommended density was 4 000 tree/ha. The density should be reduced to 2 500–3 000 tree/ha at 40 years. For a 50-year-old stand, the optimal density range for soil nutrients was 1 000–1 500 tree/ha. The appropriate stand density can ensure that the soil nutrient status of the forest land is maintained at an optimal level, which is beneficial for the current sustainable management of the artificial forest and the continuous function of subsequent soil conservation.

Key words: soil stoichiometric characteristics; stand age; stand density; *Pinus tabuliformis* plantation; loess area of western Shanxi Province

树木生长发育离不开土壤, 土壤养分格局直接影响森林生态系统的稳定性。植物从土壤中吸收养分的同时, 又经过微生物分解作用将有机质等养分返还土壤, 构成生物小循环系统^[1], 这一过程对于森林生态系统生态服务功能的可持续发展至关重要^[2]。生态化学计量学是研究生态系统能量和化学元素能量平衡的学科, 探讨元素平衡影响生态过程的交互作用^[3]。土壤碳氮磷元素紧密联系, 其化学计量特征对于植被生长和土壤养分循环至关重要^[4]。因此, 研究人工林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征对于探究林地土壤养分循环、林分生态功能发挥有重要的参考价值^[5], 是林业科学研究中的热点问题。

黄土高原是世界上面积最大的黄土覆盖区, 也是我国水土流失最为严重的地区之一^[6]。20 世纪 70 年代开始, 国家在黄土高原实施了以防治水土流失、改善生态环境为目标的植被恢复与重建工作。尤其自 1999 年退耕还林工程实施以来, 黄土高原的植被覆盖度显著增加, 土壤肥力得到了显著改善^[7]。油松 (*Pinus tabuliformis*) 根系发达、耐严寒、耐干旱、适应能力强, 具有良好的水土保持作用和改善生态环境等生态服务功能^[8-9]。作为黄土高原地区最主要的人工造林树种, 油松在不同时期都被大面积栽植, 形成了不同林龄的油松人工林, 这对防治黄土高原水土流失和改善生态环境起到了积极作用。但从造林到林分郁闭这一持续生长过程中, 林分结构逐渐发生变化, 不同林龄人工林内异质性显著上升^[10], 导致土壤化学计量随林龄变化出现差异性分化。赵丹阳等^[11]指出晋西黄土区不同林龄林地土壤养分差异显著。林分密度作为重要的林分结构指

标, 在森林经营管理中更容易调控^[12]。合理的密度调控会提升土壤微生物和相关酶活性、加快树木根系与枯落物的周转^[13]、影响土壤碳氮磷计量特征^[14], 改善土壤养分条件^[15], 从而更好地发挥林地土壤保育功能。

林木生长过程中随着林龄增大, 生存资源需求上涨, 树木之间竞争加剧^[16], 此时林分过密会影响林木质量, 林分过稀则不能充分利用林地空间^[17], 因此不同林龄阶段必然有相应的适宜密度^[18]。目前多数研究单独探究林龄或林分密度对人工林地土壤化学计量影响, 而对于不同林龄条件下土壤化学计量特征对密度响应的研究相对较少。特别是在黄土高原等土壤贫瘠地区, 缺乏对不同林龄人工林保育土壤养分的最佳林分密度分析。在人工林林龄持续增长过程中, 初植密度是否会在一定程度上制约林分对土壤养分的持续改良效应, 后续的间伐保留密度是否应根据不同林龄阶段灵活调整, 这对我国黄土高原区域的生态功能恢复和保护至关重要。因此, 本研究以晋西黄土区蔡家川流域不同林龄、不同密度的油松人工林为对象, 分析油松林地土壤碳氮磷计量特征对林龄和密度的响应, 探究不同林龄油松人工林的适宜密度, 以期为黄土高原等土壤贫瘠地区水土保持人工林的可持续经营与生态服务功能的高效发挥提供科学依据和理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(36°14'27" ~

36°18'23"N, 110°39'44" ~ 110°47'45"E), 是森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地(图1)。流域地势东高西低、东西狭长, 海拔 890 ~ 1 600 m, 属黄土丘陵沟壑区, 褐土, 黄土母质。暖温带大陆性气候, 年均气温 8.9 °C, 年均降水量 575.9 mm, 年日照时数 2 563.8 h, 无霜期 172 d。主要人工造林树种为油松、

华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*), 灌木有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、连翘(*Forsythia suspensa*)等, 草本层有藁草(*Carex* sp.)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)等。

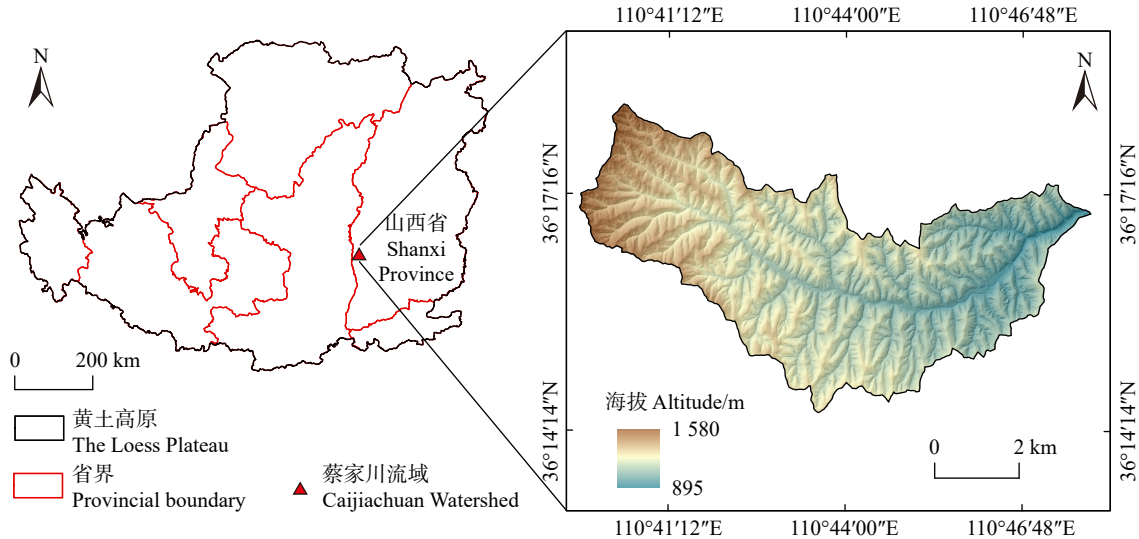


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area location

1.2 样地设置与林分调查

2023年4—8月, 根据初步调查结果, 在蔡家川流域选取3种林龄(30、40、50 a)和3种密度(1 000 ~ 1 500 株/hm²、2 500 ~ 3 000 株/hm²、4 000 ~ 4 500 株/hm²)的油松人工林为研究对象, 设置 20 m × 20 m 的调查样地。每种林分分别设置3块样地, 样地间距大于 100 m 并远离林分边缘, 共选取 27 块样地。样地的坡度、海拔、栽种前茬、造林前土壤养分基本保持一致^[19]。在每个样地内进行每木检尺和基本信息调查, 记录树高、胸径、冠幅、坡度、海拔等信息, 选择标准木进行树干解析, 使用分段求积法获取解析木材积、计算林分蓄积量, 确定油松林龄及生长过程。样地基本信息如表 1 所示。

1.3 样品采集与测定方法

分别在 27 块样地的坡上、坡中、坡下 3 个部位挖 0 ~ 100 cm 深的土壤剖面, 每 10 cm 土层取 3 个土壤样品混合后装入密封袋, 带回实验室后去除根系、杂质等, 放置于通风干燥处自然风干, 过 2 mm 土筛后进行土壤碳氮磷含量的测定。

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量采用重铬酸钾氧化外加加热法测定; 土壤全氮(total nitrogen, TN)含量采用浓硫酸-高氯酸混合消煮-凯氏定氮法测定; 土壤全磷(total phosphorus, TP)含量采用浓硫酸-高氯酸混合消煮-钼锑抗比色法测定。

计算碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)。

1.4 数据分析方法

观测数据使用 Excel 2016 进行计算和处理; 在 SPSS 26.0 软件中使用多因素方差分析(multi-way ANOVA)比较林龄、密度和土层深度及其交互作用对油松人工林土壤碳氮磷计量特征的影响, 在 $\alpha = 0.05$ 的水平上检验差异的显著性, 使用 Pearson 法对土壤碳氮磷计量特征及林分生长指标进行相关性分析; 使用 Origin 2022 绘制图像。

2 结果与分析

2.1 油松林龄、密度与土层深度对土壤化学计量影响的方差分析

表 2 显示: 除土壤 TP 含量外, 林龄或密度对其他土壤化学计量指标影响显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 土层深度对 SOC、TN、C:P 和 N:P 的影响极显著($P < 0.01$)。多因素交互作用分析中, 林龄 × 密度对 SOC、TN、C:N、C:P 和 N:P 影响显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 林龄 × 土层深度、密度 × 土层深度和林龄 × 密度 × 土层深度对所有指标没有表现出显著影响($P > 0.05$)。

2.2 不同条件下油松林地土壤碳氮磷含量

图 2 为不同油松林地 0 ~ 100 cm 土层的土壤平均碳氮磷含量。从中可以看出, 30 a 油松林地土

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of sample plots

林分类型 Stand type	林龄/a Stand age/year	林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density/ (tree·ha ⁻¹)	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	单木材积 Single tree volume/m ³	林分蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²) Stand volume/ (m ³ ·ha ⁻¹)
YD		1 125	34	1 189	14.55	8.33	0.24	271.72
		1 025	28	1 139	14.13	7.52	0.19	203.53
		1 250	30	1 158	14.04	8.22	0.22	279.98
YZ	30	2 650	30	1 075	10.98	8.67	0.15	410.43
		2 875	27	1 171	12.86	9.79	0.23	674.33
		2 800	30	1 196	11.82	7.85	0.14	417.56
YG		4 475	36	1 252	10.67	10.12	0.18	846.17
		4 000	29	1 290	10.92	9.19	0.16	671.92
		4 100	20	1 357	9.48	8.15	0.11	467.55
ZD		1 266	38	1 350	13.65	8.87	0.22	280.74
		1 175	36	1 403	14.37	9.47	0.28	337.77
		1 475	28	1 367	15.30	11.15	0.40	600.23
ZZ	40	2 875	34	1 340	9.03	6.44	0.07	213.89
		2 900	26	1 358	12.70	10.28	0.24	719.19
		2 788	22	1 370	11.90	10.13	0.22	615.55
ZG		4 200	22	1 279	10.60	8.27	0.13	575.26
		4 500	24	1 339	10.11	7.03	0.10	451.04
		4 425	30	1 366	8.84	6.76	0.07	342.94
LD		1 200	21	1 372	14.66	8.01	0.23	276.94
		1 375	25	1 385	14.21	10.11	0.31	430.48
		1 500	25	1 390	14.63	10.36	0.33	509.22
LZ	50	2 975	30	1 336	11.87	10.16	0.22	657.48
		3 000	21	1 333	10.94	7.37	0.12	362.91
		2 600	25	1 354	13.27	9.72	0.24	631.99
LG		4 000	31	1 199	9.84	6.12	0.07	314.71
		4 025	21	1 307	11.02	10.47	0.20	840.07
		4 088	20	1 344	11.37	8.98	0.17	702.65

注: 林分类型中字母Y、Z、L分别代表30、40、50 a 3种林龄; 字母D、Z、G分别代表低(1 000~1 500株/hm²)、中(2 500~3 000株/hm²)、高(4 000~4 500株/hm²)3种密度。Notes: letters Y, Z, and L in stand type represent 30, 40, and 50 years, respectively; and the letters D, Z, and G represent low (1 000–1 500 tree/ha), medium (2 500–3 000 tree/ha), and high (4 000–4 500 tree/ha) densities, respectively.

表 2 油松人工林地土壤 C、N、P 含量及化学计量比的多因素方差分析

Tab. 2 Multi-way ANOVA of soil C, N and P contents and stoichiometric ratios of *Pinus tabulaeformis* plantation

因素 Factor	土壤有机碳含量 Soil organic carbon (SOC) content	全氮含量 Total nitrogen (TN) content	全磷含量 Total phosphorus (TP) content	土壤碳氮比 Soil C:N	土壤碳磷比 Soil C:P	土壤氮磷比 Soil N:P
林龄 Stand age	20.32**	1.32*	1.28	42.95**	29.01**	3.83*
密度 Density	4.67*	3.27*	0.97	5.64**	3.32*	3.70*
土层深度 Depth of soil layer	65.63**	35.99**	0.27	1.28	62.48**	39.80**
林龄 × 密度 Stand age × density	6.01**	1.98*	1.22	5.45**	7.32**	3.55**
林龄 × 土层深度 Stand age × depth of soil layer	1.59	0.72	0.34	0.37	1.86	0.94
密度 × 土层深度 Density × depth of soil layer	0.83	0.61	0.36	0.35	0.56	0.55
林龄 × 密度 × 土层深度 Stand age × density × depth of soil layer	0.79	0.78	0.34	0.52	1.07	0.98

注: *, **分别代表在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平上显著相关。下同。表中数字为 F 值。Notes: * and ** represent significant correlations at level of $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. Same as below. The numbers in the table are F values.

壤 SOC 含量随林分密度的增大而增大,在密度为 4 000~4 500 株/hm² 时, SOC 达到最大,为 4.40 g/kg。40 a 和 50 a 林地的土壤 SOC 随密度上升而减小,最小值分别为 4.33 和 4.30 g/kg,此时高密度 SOC 含量显著低于中低密度($P < 0.05$)。30 a 油松林地土壤 TN 随密度的增加而增大,最大值为 0.59 g/kg; 40 a 的油松林地土壤 TN 随林分密度增大而先增后减,在密度为 2 500~3 000 株/hm² 时达到最高,为 0.61 g/kg; 50 a 的油松林地土壤 TN 随密度增加而逐渐减小,在密度为 4 000~4 500 株/hm² 时 TN 最低,为 0.54 g/kg。

在相同密度条件下,林分密度为 1 000~1 500 株/hm² 时,土壤 SOC 随着林龄的增加而增大,50 a 油松林地 SOC 最高,为 5.45 g/kg; 土壤 TN 随林龄的增加呈先减后增趋势,50 a 油松林地 TN 最高,为 0.64 g/kg; 低密度条件下,50 a 林分土壤 C、N 含量较 30 a 林地显著上升($P < 0.05$)。林分密度为 2 500~3 000 株/hm² 时,土壤 TN 和 SOC 均随林龄的增加呈先增后减趋势,40 a 油松林地 TN 和 SOC 均为最高,分别为 0.61 和 5.45 g/kg。林分密度 4 000~4 500 株/hm² 时,土壤 SOC 随林龄的增加逐渐减小,50 a 油松林地 SOC 仅为 4.30 g/kg; 40 a 油松林地土壤 TN 最低,仅为 0.47 g/kg。在不同条件下,土壤 TP 含量均无显著差异($P > 0.05$)。

图 3 为不同林龄、密度油松林地 0~100 cm 土层土壤养分含量随土层深度的垂直变化图。各林地土壤 TP 含量随土层深度呈波动变化,但不同土层的 TP 没有显著差异($P > 0.05$); TN 和 SOC 总体上具有随土层深度增加而降低的趋势,但不同条件下,油松林地的变化深度和幅度并不相同。

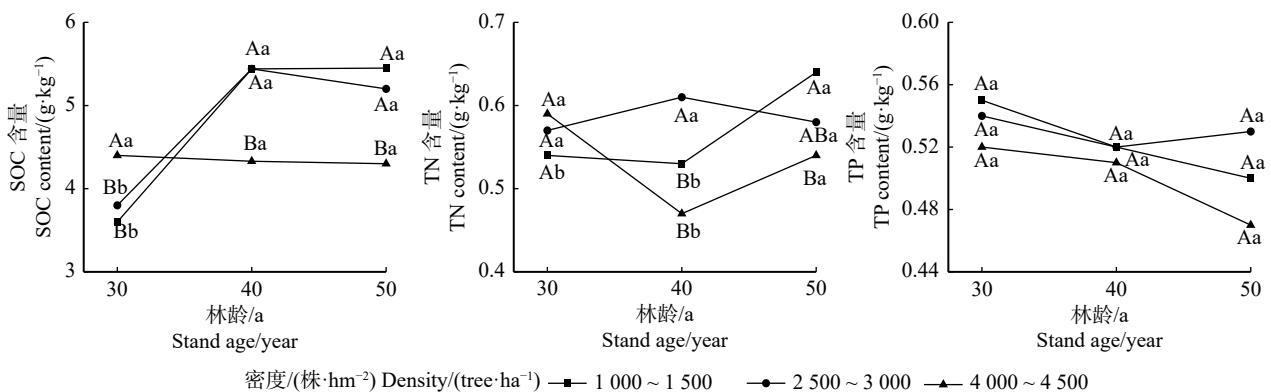
林龄 30 a 的油松林地密度为 1 000~1 500 株/hm²、2 500~3 000 株/hm²、4 000~4 500 株/hm² 时,

0~10 cm 土层的 TN 占整个土层的比例分别为 15.84%、19.38%、18.83%,0~20 cm 土层的 TN 占整个土层的比例分别为 26.52%、37.18%、32.67%,可见土壤 TN 主要分布在 0~20 cm 土层中。40 a 的油松林地 3 个密度下,0~10 cm 土层的 TN 占整个土层的比例分别为 23.58%、20.02%、21.17%,0~20 cm 土层的 TN 占整个土层的比例分别为 39.98%、35.31%、36.26%。与 30 a 林龄相比,40 a 林龄油松林地表层土壤 TN 含量占比上升。50 a 油松林地的 3 个密度下,0~10 cm 土层 TN 占整个土层的比例分别为 15.31%、21.74%、16.54%,0~20 cm 土层的 TN 占整个土层的比例分别为 27.86%、32.75%、29.93%。土壤 SOC 的变化与 TN 含量变化相似。低、中密度的表层土壤养分含量随林龄增加而增加,而在高密度条件下,50 a 林分的表层土壤 SOC 和 TN 含量均低于 30、40 a 时。

2.3 不同条件下油松林地土壤碳氮磷化学计量比

图 4 为不同林龄和密度油松林地 0~100 cm 土壤平均化学计量比。在相同林龄条件下,30 a 林分土壤的 C:N 随着林分密度的增加而先降低后增加,最大值 7.62 出现在高密度林分,C:P 和 N:P 则随着林分密度上升而增大。在 40 a 林分中,0~100 cm 土壤 C:N 和 C:P 随着林分密度增大而降低,而 N:P 则先增大后降低,最大值 1.16 出现在中密度条件下。50 a 林分中,C:N、C:P 和 N:P 3 种化学计量比最大值分别出现在中、低、低密度条件下。

在低密度林分中,随林龄增加,C:N 先增大后减小,最大值为 10.5; C:P 和 N:P 呈增加趋势。在中等密度林分中,土壤 C:P 和 N:P 均随着林龄的上升呈现出先增大后减小的趋势。高密度条件下,随着林龄的提升,C:P 和 N:P 呈先减小后增大趋势,C:N 则呈现相反变化趋势。



不同大写字母表示相同林龄,不同密度之间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示相同密度,不同林龄之间差异显著($P < 0.05$)。下同。Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between varied densities of the same stand age, and different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between varied stand ages of the same density. Same as below.

图2 不同林龄和密度油松林 0~100 cm 土壤养分含量

Fig. 2 Nutrient contents of 0~100 cm soil of different stand ages and densities of *Pinus tabulaeformis* plantation

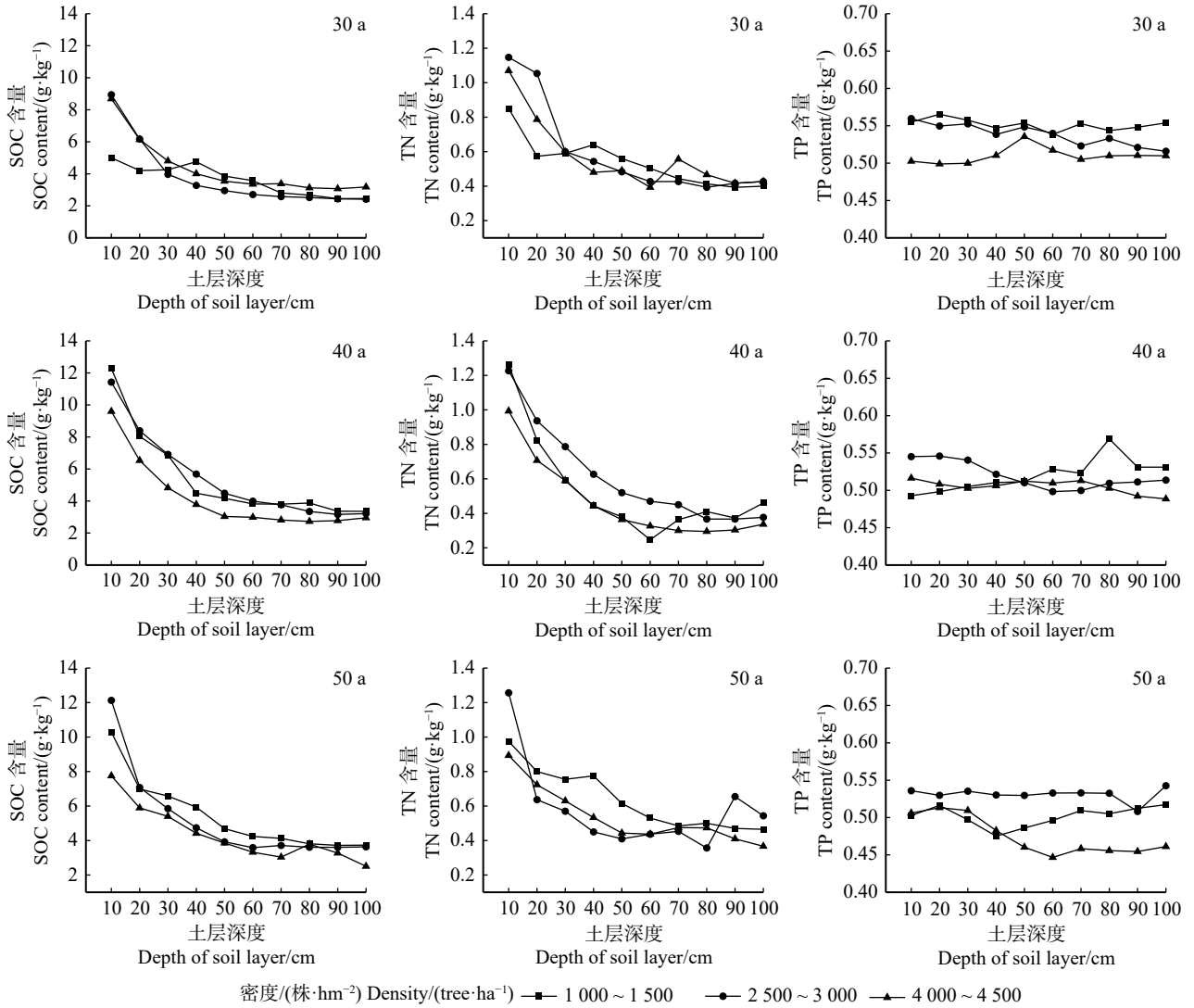


图 3 不同林龄、密度油松林地 0~100 cm 分层土壤养分含量

Fig. 3 Nutrient contents in different soil layers of 0–100 cm of *Pinus tabuliformis* plantation with different stand ages and densities

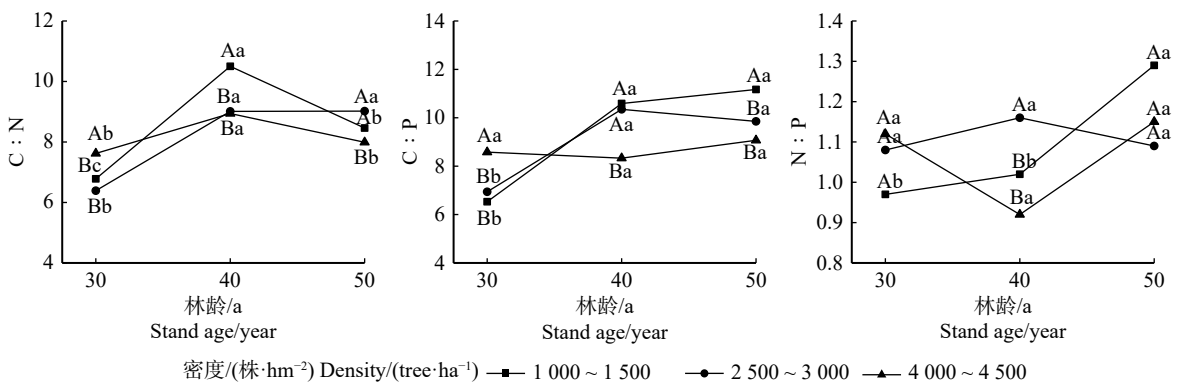


图 4 不同林龄和密度油松林 0~100 cm 土壤化学计量比

Fig. 4 Stoichiometric ratios of 0–100 cm soil of different stand ages and densities of *Pinus tabuliformis* plantation

图 5 为不同林龄、不同密度油松林地 0~100 cm 土层土壤化学计量比随土层深度的垂直变化。各林分类型土壤 C:P 和 N:P 总体上呈现随土层深度增加而减小的趋势, 主要差异体现在表层土壤。C:N 则呈现波动变化, 在垂直分布上趋于稳定, 各土层之

间没有显著差异。和 C:P 一样, 30、40 和 50 a 林龄条件下 N:P 的最大值分别出现在高、中、低密度 0~10 cm 土层, 并随着土层深度增加而降低。林龄对不同密度的林分土壤化学计量比影响趋势不同。在中密度林分中, 随着林龄的增长, 林分表层土壤化

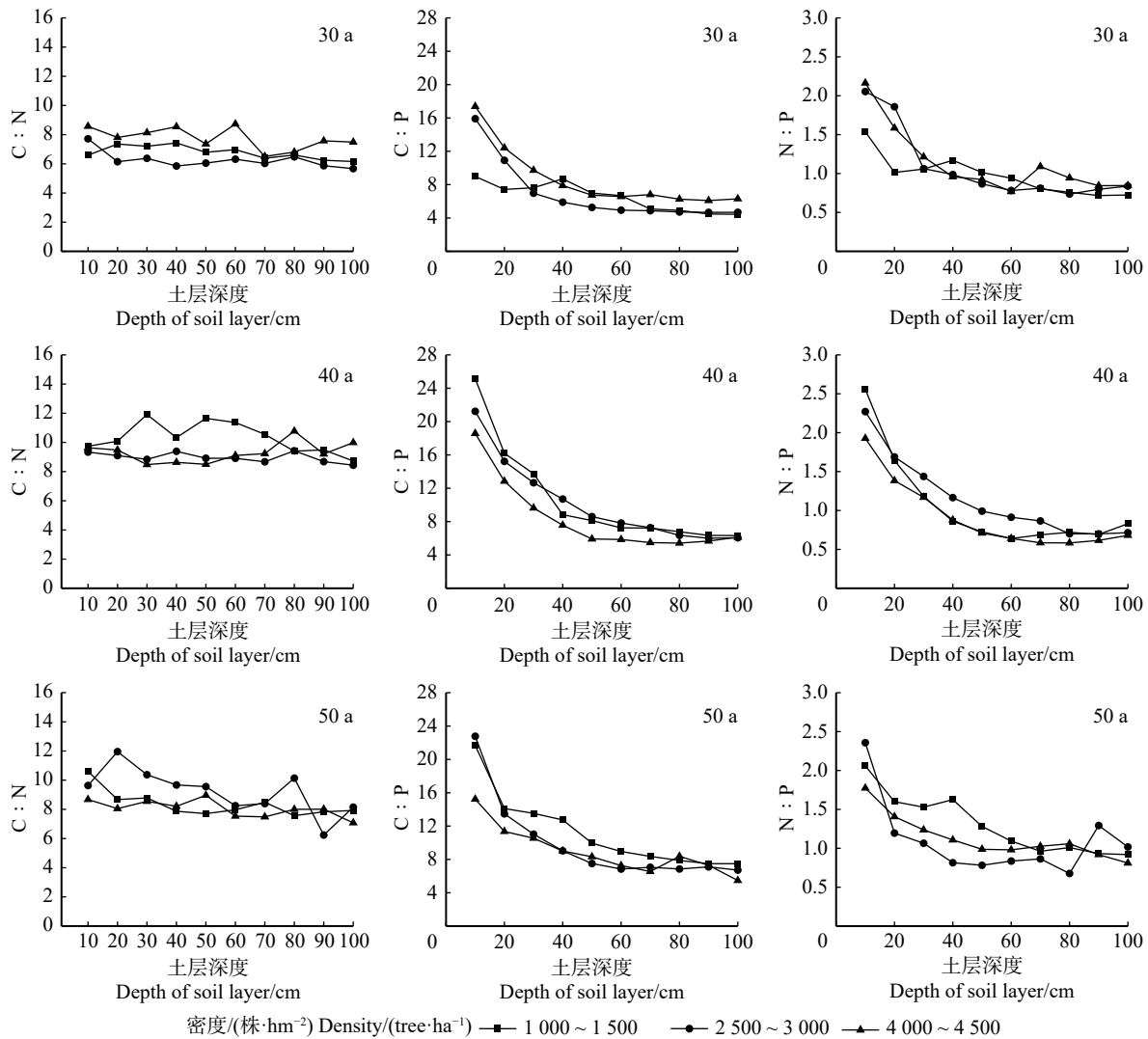


图5 不同林龄、密度油松林地0~100 cm土壤化学计量比

Fig. 5 Stoichiometric ratios in different soil layer of 0–100 cm of *Pinus tabulaeformis* plantation with different stand ages and densities

学计量比增加,而对于深层土壤的影响不显著($P > 0.05$)。

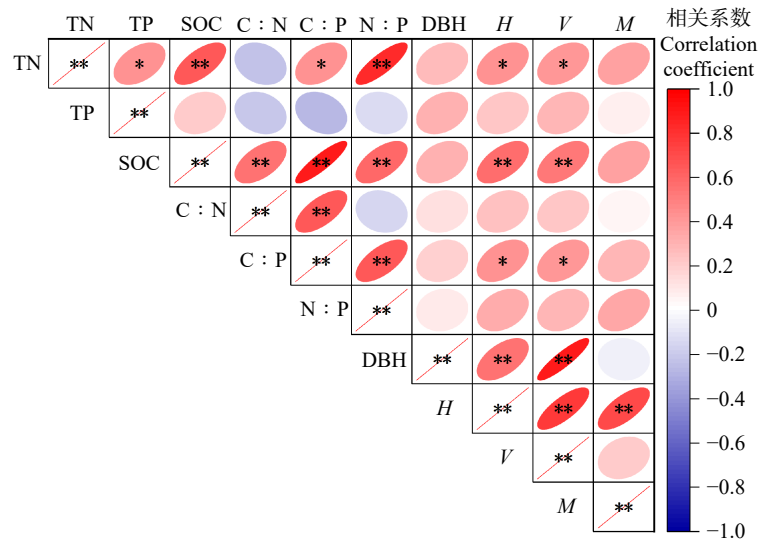
2.4 油松林地土壤化学计量与林分生长的相关关系

由图6得出:土壤TN含量与TP、SOC、C:P、N:P均呈显著正相关($P < 0.05$);TP与除TN外各指标的相关性均表现为不显著($P > 0.05$);SOC与C:N、C:P、N:P呈极显著正相关($P < 0.01$);C:P和C:N、N:P均呈极显著相关($P < 0.01$)。林分的平均树高、单木材积与TN、SOC、C:P呈显著正相关($P < 0.05$)。SOC与C:P的相关性最强,相关系数达到了0.97, SOC与TN、N:P的相关性次之,相关系数均为0.87, TN和C:P的相关系数为0.82。相对于土壤SOC、TN含量,TP与各指标的相关系数较小、相关性弱,这说明在研究区内,土壤P元素的变化对化学计量比的影响较小,土壤TN在N、P比例的调节中发挥关键作用,土壤SOC对N元素及化学计量比有极显著影响($P < 0.01$),土壤C、N元素含量对树高生长和单木材积有正向调节作用。

3 讨论

3.1 土壤碳氮磷计量特征变化规律

土壤C、N、P含量代表着土壤养分水平,C:N、C:P和N:P是评估土壤养分含量限制状况的指标,能够表征土壤养分供应的协调性^[20-21]。多因素方差分析表明,林龄、密度对土壤养分含量和化学计量比有显著影响,土层深度、林龄和密度的交互作用对多数土壤化学计量指标有显著影响。研究通过对比分析不同条件下油松林地0~100 cm土壤平均C、N、P化学计量,结果表明在油松林龄30 a时,随着林分密度的增加,SOC、C:P和N:P也随之增加;而当林龄达到50 a时,密度的提升会降低SOC、C:P和C:N值。这与巩大鹏等^[22]的研究结论相似,但和朱燕等^[23]的研究结果存在差异,原因可能是油松林在30 a时根系生长旺盛、生产力较强,林分密度的增大能提高土壤SOC含量,使得C:P上升。而到了50 a时,高密度的油松林根系已经发育较为完善,树木对



DBH. 胸径; H. 树高; V. 单木材积; M. 林分蓄积量。DBH, diameter at breast height; H, tree height; V, single tree volume; M, stand volume.

图 6 油松人工林地土壤 C、N、P 含量、化学计量比与林分生长的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of soil C, N and P contents, stoichiometric ratios and growth of *Pinus tabulaeformis* plantation

养分资源利用策略改变^[24]的同时,种内竞争加剧,微生物分解效能随之改变^[25],导致土壤 SOC 含量下降,C:P 和 C:N 降低。这表明不同林龄下,适宜油松林土壤保育功能发挥的林分密度不同。在低密度条件下,随着林龄增加,林分持续生长,显著改善了土壤养分条件,这与席丽等^[26]的研究结果一致。但在高密度时,持续生长的油松反而降低了土壤肥力,这是因为在低密度条件下,油松林林龄达到 50 a 时,土壤出现地力衰退现象,林龄的增长对 C:P 和 N:P 改良效果不显著($P > 0.05$)。这表明,过高的林分密度限制了林龄对土壤养分的正向影响。在不同密度和林龄条件下,土壤 TN 含量和 C:N 呈波动变化,未显示明显的变化趋势。TP 含量变化不显著,这与尹明宇等^[27]的研究结果存在差异。结合我国黄土区表层土壤化学计量数据^[28],研究区域氮磷元素严重匮乏,N:P 接近于 1。这主要是由于研究区水土流失严重,导致土壤固持养分能力较差^[1]。因此,调控不同时期林分的适宜密度,对于人工林土壤保育功能的发挥至关重要。

比较各油松人工林分 0~100 cm 土层的土壤化学计量得出,总体上土壤 TN、SOC、C:P 以及 N:P 随着土层深度增加而降低,这与朱燕等^[23]结论相一致。土壤 TP 含量没有显著差异($P > 0.05$),这与武燕等^[29]研究结果一致。土壤 SOC 和 TN 含量在垂直方向分布趋势相似,导致 C:N 在土壤剖面中并未表现出明显的变化规律。这表明在该研究区内,碳氮变化是协同相关的^[30]。林分密度过大或过小都会导致林地土壤退化和酸化现象^[31]。在不同林龄时期,适宜的林分密度对土壤化学性质的影响在纵深和幅度上存在差异,这与李雪等^[25]研究结果相一致。30 a

林龄时,中密度条件可以有效减少土壤 TN 和 SOC 纵向流失,维持 N:P、C:P 稳定。林龄 40 a 时,这种效益变得不显著。林龄 50 a 时,虽然中密度林分表层土壤全氮含量最高,但到了 20 cm 深度,全氮和有机质含量迅速下降。可能是由于 50 a 林分有大量凋落物积累,在土壤表层分解后使得土壤酸化,抑制微生物的分解^[32],从而影响养分释放和土壤肥力的维持。因此,不同林龄时期选取合适的密度可以有效减少土壤养分纵向流失。

3.2 土壤碳氮磷含量、化学计量比以及林分生长的相关关系

相较于 SOC、TN 含量,TP 与各指标的相关系数较小,相关性多为不显著,说明研究区土壤养分格局主要受 SOC 与 TN 含量的影响,C 和 N 元素是研究区土壤养分变化的主要限制因子^[33]。结合研究区实际情况,油松林地有大量枯落物覆盖,而 SOC 与 TN 多来源于植被凋落物和根系残留物分解形成的有机质^[34]。因此,C、N 元素在林地土壤养分变化中逐渐占据主导地位。土壤 P 元素与其他元素的变化不耦合。通过将土壤化学计量与油松树高、胸径、单木材积以及林分蓄积量进行相关性分析,发现土壤碳氮含量对油松树高和单木材积有显著正相关关系,这与詹紫馨等^[35]的研究结果相似。考虑到研究试验地位于黄土高原,水土流失极其严重,生态环境较为脆弱^[36],因此在对油松人工林土壤养分进行保育时,应重点考虑碳氮元素在养分循环中的作用,在保证林木健康生长的同时,对该地区养分含量及化学计量比进行均衡调控。

3.3 基于土壤养分改良的油松人工林密度调控

研究对油松人工林分土壤 C、N、P 计量特征的

分析结果表明,在低林龄阶段,较高密度的人工林更能有效发挥土壤保育功能。对于高林龄油松林,土壤养分改良则需要更低的林分密度,这与 Liu 等^[37]的研究结论一致。研究区水土流失极为严重,基于土壤养分改良目标,油松人工林的最适密度随着林龄增长而逐渐变小,这与罗也等^[38]的研究结果一致。在油松人工林实际抚育管理中,林龄是随时间自然增长的,而林分密度则可以通过科学间伐和补植手段进行调控。这种管理策略有助于加速人工林的自然演替^[39]。不同林龄的油松林维持最优土壤养分条件的林分密度不同,虽然较高的密度有利于林分生物量积累,但会引起土壤养分的匮乏^[40]。适宜的密度能够改善林分环境、提高群落稳定性^[41],因此应根据不同林龄的油松林采取不同的调控密度。在研究区域内,林龄 30 a 的油松应将密度控制在 4 000 株/hm² 以下,有利于土壤保育功能发挥; 40 a 林龄时,密度应调整为 2 500 ~ 3 000 株/hm²; 林龄 50 a 时,密度为 1 000 ~ 1 500 株/hm² 时,林分土壤养分格局最为合适。研究同时发现,在低密度林分中,土壤养分随着林龄的增大而上升,此时林分的持续生长改良了土壤碳氮磷计量,这与何普林等^[42]的研究结果一致。而在高密度的林分条件下,这种持续改良效果被削弱,高林龄林地土壤出现了不同程度的地力衰退,这是由于初植密度越大,营养空间越小,油松人工林越快进入资源竞争阶段^[43],进而导致林分高林龄时期土壤养分退化。因此人工林管理经营中对现有林分抚育间伐的同时,黄土高原地区后续初始造林密度也应调整至 4 000 株/hm² 以下,以持续发挥人工林在水土保持和土壤保育方面的作用。

4 结 论

通过分析蔡家川流域不同林龄和密度油松人工林土壤碳氮磷化学计量特征,得出以下结论:林龄和密度以及二者交互作用对油松林地土壤 TN、SOC 和化学计量比有显著影响,土层深度对土壤 TP 和 C:N 无显著影响($P > 0.05$);土壤 TN、SOC 含量与研究区的土壤化学计量、油松树高和单木材积都有显著的正相关关系;该地区 P 元素流失严重,且与其余化学计量和林木生长指标相关性较差。在黄土区对人工林抚育经营时,应依据不同林龄阶段来调整相应的林分密度,并适度降低造林密度,以保证林地土壤养分状况维持在最优状态,有利于人工林现阶段可持续经营,以及后续土壤保育功能的高效发挥。

参 考 文 献

[1] 胡亚伟,施政乐,刘畅,等. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2023, 42(9):

2072–2080.

- Hu Y W, Shi Z L, Liu C, et al. Effects of stand densities on understory vegetation diversity and soil physicochemical properties of *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9): 2072–2080.
- [2] 赵蔓, 张晓曼, 杨明洁. 林火干扰对栓皮栎-辽东栎混交林植物多样性与土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(10): 1732–1740.
- Zhao M, Zhang X M, Yang M J. Effects of forest fire disturbance on species diversity and soil physicochemical properties of *Quercus variabilis* and *Quercus wutaishansea* mixed forests[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(10): 1732–1740.
- [3] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937–3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [4] Chen Q, Shi Z, Chen S, et al. Role of environment variables in spatial distribution of soil C, N, P ecological stoichiometry in the typical black soil region of Northeast China[J/OL]. Sustainability, 2022, 14(5): 2636[2022–02–24]. <https://doi.org/10.3390/su14052636>.
- [5] 白丽丽, 王文颖, 德却拉姆, 等. 祁连山典型植被土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征的垂直变化[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 444–455.
- Bai L L, Wang W Y, Dequelamu, et al. Elevational variations in ecological soil C, N, and P stoichiometry among five typical vegetation types in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(3): 444–455.
- [6] Sun R X, Ma L, Zhang S H, et al. Study on landscape patches influencing hillslope erosion processes and flow hydrodynamics in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J/OL]. Water, 2020, 12(11): 3201[2024–11–16]. <https://doi.org/10.3390/w12113201>.
- [7] Li H, Wu Y, Liu S, et al. The Grain-for-Green Project offsets warming-induced soil organic carbon loss and increases soil carbon stock in Chinese Loess Plateau[J/OL]. The Science of the total environment, 2022, 837: 155469[2022–09–01]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155469>.
- [8] 何如梦, 王百田, 于显威, 等. 晋西黄土区油松林的生长释放与生长抑制[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(6): 1204–1210.
- He R M, Wang B T, Yu X W, et al. Growth release and growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* forest in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(6): 1204–1210.
- [9] Li Y C, Li H P, Zhang W, et al. The effects of thinning on tree growth and stand biomass in a chrono sequence of *Pinus tabulaeformis* plantations in the Loess Plateau of China[J/OL]. Forests, 2023, 14: 1620[2023–08–11]. <https://doi.org/10.3390/f14081620>.
- [10] 胡尔查, 王铮, 李梓豪, 等. 毛乌素沙地不同林龄樟子松人工林林下植物多样性和生物量的动态变化[J/OL]. 生态学杂志, 2024: 1–10[2024–08–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148>.

- Q.20240205.1812.010.html.
- Hu E C, Wang Z, Li Z H, et al. Dynamic changes of understory plant diversity and biomass of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different ages in Mu Us Sandy Land[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2024: 1–10[2024–08–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240205.1812.010.html>.
- [11] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 不同林龄刺槐林植被与土壤养分变化特征 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2021, 19(3): 56–63. Zhao D Y, Bi H X, Hou G R, et al. Evolution of vegetation and soil nutrients of artificial *Robinia pseudoacacia* forest[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 56–63.
- [12] Li Q C, Liu Z L, Jin G Z. Impacts of stand density on tree crown structure and biomass: a global meta-analysis[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 326: 109181[2022–11–15]. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109181>.
- [13] 刘超华, 李凤巧, 廖杨文科, 等. 人工林对土壤地力的影响过程及其调控研究进展 [J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 644–656. Liu C H, Li F Q, Liao-Yang W K, et al. Research progress on effects and regulation of plantation on soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 644–656.
- [14] 王宏生, 王玉琴, 宋梅玲, 等. 黄帚橐吾不同密度斑块植物、土壤和微生物碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2024, 44(10): 4297–4307. Wang H S, Wang Y Q, Song M L, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of plants, soils and microbial biomass in patches with different densities of *Ligularia virgaurea*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4297–4307.
- [15] Mehrdad Z, Gaëlle V, Nathalie K, et al. The impact of stand composition and tree density on topsoil characteristics and soil microbial activities[J/OL]. Catena, 2024, 234: 107541[2023–09–25]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107541>.
- [16] 卫朝阳, 张建军, 赖宗锐, 等. 晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10): 22–32. Wei Z Y, Zhang J J, Lai Z R, et al. Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 22–32.
- [17] 王玉芬. 林分密度在营林生产中的应用 [J]. 林业勘查设计, 2011(1): 59–63. Wang Y F. The applications of forest density in forest management[J]. Forest Investigation Design, 2011(1): 59–63.
- [18] Zhao M, Liu S H, Sun Y R, et al. Does stand density affect understory vegetation and soil properties of differently aged *Robinia pseudoacacia* plantations? [J/OL]. Forest Ecology and Management, 2023, 548: 121444[2023–11–15]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121444>.
- [19] 朱金兆. 晋西黄土残塬沟壑区立地条件类型划分的研究 [J]. 北京林学院学报, 1985, 6(4): 25–37. Zhu J Z. A study on the classification of land condition types in the Loess Plateau gully area of western Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Forestry College, 1985, 6(4): 25–37.
- [20] 成琳, 郭巧生, 朱再标, 等. “根际土–沙氏鹿茸草–寄主植物”连续体碳氮磷生态化学计量特征及耦合关系研究 [J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8326–8337. Cheng L, Guo Q S, Zhu Z B, et al. Ecological stoichiometric characteristics and the coupling relationship of carbon, nitrogen, and phosphorus in rhizosphere soil–*Monochasma savatieri*–the host continuum[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8326–8337.
- [21] Zhao W, Huang L M. Changes in soil nutrients and stoichiometric ratios reveal increasing phosphorus deficiency along a tropical soil chrono sequence[J/OL]. Catena, 2023, 222: 106893[2022–12–31]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106893>.
- [22] 巩大鹏, 毕华兴, 王劲峰, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐人工林叶片–枯落物–土壤化学计量特征 [J]. 林业科学研究, 2024, 37(2): 156–164. Gong D P, Bi H X, Wang J F, et al. Stoichiometric characteristics of leaves–litter–soil of *Robinia pseudoacacia* of different densities in the loess region of western Shanxi Province[J]. Forest Research, 2024, 37(2): 156–164.
- [23] 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 Y, Zhai B C, Sun M M, 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.
- [24] 加沙来提·阿塔吾拉, 鲁艳, 张波, 等. 塔里木盆地南缘绿洲–沙漠过渡带 8 种植物 C、N、P 生态化学计量特征的季节变化 [J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8605–8616. Jiashalaiti A, Lu Y, Zhang B, et al. Seasonal variation of C, N, and P ecological stoichiometric characteristics of 8 plant species in the oasis–desert transitional zone on the southern margin of the Tarim Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8605–8616.
- [25] 李雪, 王静, 张静, 等. 林龄和林分密度对华北落叶松人工林土壤养分和细菌群落的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(10): 83–92. Li X, Wang J, Zhang J, et al. Effects of stand age and stand density on the soil nutrient and bacterial community of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(10): 83–92.
- [26] 席丽, 李思瑶, 夏晓莹, 等. 海拔、林龄和郁闭度对天山云杉林土壤肥力的影响 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2477–2485. Xi L, Li S Y, Xia X Y, et al. Effects of altitude, stand age, and canopy density on soil fertility in *Picea schrenkiana* forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2477–2485.
- [27] 尹明宇, 吴波, 乌云塔娜, 等. 初植密度对科尔沁沙地樟子松人工林生长和健康状况及土壤化学性质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52(7): 42–52. Yin M Y, Wu B, Wuyun T N, et al. Effects of initial planting density on growth, health status and soil chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Northwest A&F University, 2024, 52(7): 42–52.
- [28] Chen Y, Li Y, Duan Y, et al. Patterns and driving factors of soil ecological stoichiometry in typical ecologically fragile areas of

- China[J/OL]. *Catena*, 2022, 219: 106628[2024-09-15]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106628>.
- [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.
- Wu Y, Huang Q, Liu X, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation age on soil physical and chemical properties in southwest karst area[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 48(3): 99-107.
- [30] 芦东旭, 耿雪琪, 崔子怡, 等. 黄土丘陵区不同林龄刺槐养分利用特征和林分质量研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(12): 90-99.
- Lu D X, Geng X Q, Cui Z Y, et al. Nutrient utilization characteristics and stand quality of *Robinia pseudoacacia* at different stand ages in the loess hilly region of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(12): 90-99.
- [31] 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 S H, Zhao M, Wang Y J, 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.
- [32] 张晓曦, 胡嘉伟, 刘凯旋, 等. 黄土丘陵区刺槐人工林林龄增加过程中土壤微环境变化对凋落物分解的影响 [J]. *生态学报*, 2024, 44(7): 2931-2945.
- Zhang X X, Hu J W, Liu K X, et al. Effects of the alterations in soil micro-environment with increasing stand age of *Robinia pseudoacacia* plantation on the litter decomposition in the loess hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 2931-2945.
- [33] 马雅莉, 高荣, 刘喜东, 等. 白于山区不同植物群落土壤碳氮磷空间分布及化学计量特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(9): 116-125.
- Ma Y L, Gao R, Liu X D, et al. Spatial distribution and stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different plant communities in Baiyu Mountain areas[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(9): 116-125.
- [34] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土壤 C:N:P 化学计量特征及土壤理化性质的影响 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 990-999.
- Hu Y W, Sun R X, Shen M S, et al. Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C:N:P and the physical and chemical properties of soil in western Shanxi loess region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 38(4): 990-999.
- [35] 詹紫馨, 冯天骄, 梅柏寒, 等. 晋西黄土区典型植被恢复生态系统各层次化学计量与生态因子的关系 [J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(4): 797-809.
- Zhan Z X, Feng T J, Mei B H, et al. Relationship between stoichiometry and ecological factors at various levels of typical vegetation restoration ecosystem in the loess area of western Shanxi Province[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2024, 41(4): 797-809.
- [36] Ma Y H, Chen H, Liu D, et al. Identification and management of priority regulation areas based on the supply-demand relationship of ecosystem services: a case study of the Loess Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111754[2024-02-15]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111754>.
- [37] Liu T R, Peng D L, Tan Z J, et al. Do stand density and month regulate soil enzymes and the stoichiometry of differently aged *Larix principis-rupprechtii* plantations? [J/OL]. *Catena*, 2023, 220: 106683[2024-10-21]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106683>.
- [38] 罗也, 王君, 杨雨春, 等. 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(6): 10-19.
- Luo Y, Wang J, Yang Y C, et al. Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(6): 10-19.
- [39] 张煜林, 刘玲娟, 刘胜龙, 等. 不同密度杉木萌生林自然恢复初期群落结构对生态系统碳密度的影响 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 289-297.
- Zhang Y L, Liu L J, Liu S L, et al. Effects of community structure of *Cunninghamia lanceolata* sprouting forests with different densities on ecosystem carbon density at the early stage of succession[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(2): 289-297.
- [40] Chen B M, Liu S S, Yu J H, et al. Stand biomass of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations benefits from high density monocultures in the boreal zone[J/OL]. *Forest Ecosystems*, 2024, 11: 100222[2024-07-08]. <https://doi.org/10.1016/j.feecs.2024.100222>.
- [41] 罗也, 何怀江, 张忠辉, 等. 张广才岭不同林分密度下物种组成及其多样性 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(11): 131-141.
- Luo Y, He H J, Zhang Z H, et al. Species composition and diversity under different stand densities in Zhangguangcailing[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(11): 131-141.
- [42] 何普林, 徐其贤, 王忠林, 等. 林龄和土层对柠檬桉林土壤养分和易氧化有机碳的影响 [J]. *林业科学研究*, 2024, 37(2): 115-123.
- He P L, Xu Q X, Wang Z L, et al. Effects of stand age and soil layer on soil nutrients and readily oxidizable organic carbon concentrations of *Eucalyptus citriodora* plantations[J]. *Forest Research*, 2024, 37(2): 115-123.
- [43] 杨桂娟, 胡海帆, 孙洪刚, 等. 林分年龄、造林密度和林分自然稀疏对杉木人工林个体大小分化和生产力关系的影响 [J]. *林业科学*, 2019, 55(11): 126-136.
- Yang G J, Hu H F, Sun H G, et al. The influences of stand age, planting density and self-thinning on relationship between size inequality and periodic annual increment in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(11): 126-136.

(责任编辑 孟瑶 李契
责任编辑 臧润国)