

晋北黄土丘陵沟壑区柠条锦鸡儿化学计量特征及影响因素

闫佳兴^{1,2}, 石文凯³, 韩海荣^{1,2*}, 吴会峰^{1,2}, 程小琴^{1,2}, 康峰峰^{1,2},
王洁茹^{1,2}, 李华一^{1,2}

(1. 北京林业大学 生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 七老图森林生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 赤峰 024400;
3. 山西省林业和草原工程总站, 山西 太原 030012)

摘要:以晋北黄土丘陵沟壑区柠条锦鸡儿人工林为研究对象,通过分析柠条锦鸡儿枝叶化学计量特征及其与土壤因子的关系,揭示柠条锦鸡儿养分分配格局与环境适应策略。结果表明,1)柠条锦鸡儿叶 N、P 含量为混交林中较高,枝 N、P 含量则相反;叶 C:P、N:P 为混交林中较低,樟子松+柠条锦鸡儿混交林有效缓解了 P 限制;不同器官下, N、P 为叶>枝, C:P、C:N 为枝>叶。种植方式与器官对 C、N、P 及其计量比影响较大。2)纯林与混交林间 C、N、P 两两比例关系差异不显著, C 的累积速率显著大于 N、P; 器官中, 叶 C-N、C-P 为异速比例关系, 而枝为等速比例关系, C 养分累积速率为叶>枝, 枝叶 N、P 累积速率较为一致。3)在不同种植方式下柠条锦鸡儿叶、枝 P 含量受土壤含水量、有机碳、全磷(TP)的影响明显;器官下, 叶比枝更敏感, 易受土壤因子的影响, 土壤含水量、TP、有机碳是影响叶养分及比例的关键土壤因子, TP 是影响枝养分及比例的关键土壤因子。综上,在土壤养分与水分限制下,柠条锦鸡儿采取叶>枝养分分配格局,快速累积 C 的适应策略,其化学计量与土壤因子关系密切与不同种植方式有关,种植方式会影响柠条锦鸡儿 C、N、P 及计量比,但不会改变 C、N、P 间的特定耦合比例。

关键词:柠条锦鸡儿;化学计量;养分累积;适应策略;土壤因子

中图分类号:S793.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0029-09

Stoichiometric Characteristics and Influencing Factors of *Caragana korshinskii* in the Hilly and Gully Region of the Loess Plateau of Northern Shanxi

YAN Jia-xing^{1,2}, SHI Wen-kai³, HAN Hai-rong^{1,2*}, WU Hui-feng^{1,2}, CHENG Xiao-qin^{1,2},
KANG Feng-feng^{1,2}, WANG Jie-ru^{1,2}, LI Hua-yi^{1,2}

(1. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Qilao Mountain National Observation and Research Station of Chinese Ecosystem, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China;

3. Shanxi Forestry and Grassland Engineering Station, Taiyuan 030012, Shanxi, China)

Abstract: The study was carried out in *Caragana korshinskii* plantations in the hilly and gully region of the Loess Plateau of Northern Shanxi Province, China. By analyzing the stoichiometric characteristics of branches and leaves of *C. korshinskii* and their relationships with soil factors, the nutrient allocation patterns and environmental adaptation strategies of *C. korshinskii* were revealed. The results showed that 1) the leaf N and P contents of *C. korshinskii* were both higher in the mixed forest, while the opposite was true for branch N and P contents. Leaf C:P and N:P ratios were lower in mixed forests, *P. sylvestris* var. *mongolica* + *C. korshinskii* mixed forest effectively mitigated P limitation. For all organs, the contents of N and P were in the order of leaf>branch, and the ratios of C:P and C:N were branch>leaf. The C, N, and

收稿日期:2022-08-30 修回日期:2022-10-31

基金项目:国家重点研发计划(2019YFA0607300);林业科技创新平台运行补助项目(2020132075)。

第一作者:闫佳兴。研究方向:森林生态学、植物功能性状。E-mail:jiayay1717@163.com

*通信作者:韩海荣,博士,教授,博士生导师。研究方向:森林生态学、生态规划与管理。E-mail:hanhr@bjfu.edu.cn

P contents and their stoichiometric ratios were significantly affected by planting patterns and organs. 2) No significant differences were found between the pure and mixed forests in proportional relationship among C, N and P, the rate of carbon accumulation *C. korshinskii* was significantly higher than that of N and P. For the organs, the proportion of C-N and C-P in leaves was allometric, while the proportion of C-P in branches was isokinetic. The rate of C nutrient accumulation in leaves was remarkably higher than in branches, and the rate of N and P accumulation in branches was more consistent. 3) Under different planting patterns, the P content of *C. korshinskii* leaves and branches were significantly affected by soil water content, organic carbon and total phosphorus. The leaves were more susceptible to soil factors than branches. Soil water content, total phosphorus and organic carbon were the key soil factors affecting leaf nutrients and proportion, while total phosphorus was the key soil factor affecting branch nutrients and proportion. To summarize, under the limitation of soil nutrient and moisture, *C. korshinskii* employs the nutrient distribution pattern of higher in leaves than branches, and rapid carbon accumulation strategy to overcome the limitation. The close relationship between stoichiometry and soil factors are related to planting patterns. C, N, P and metering ratio of *C. korshinskii* are affected by planting patterns, but the specific coupling ratio of C, N, P of *C. korshinskii* are not changed.

Key words: *Caragana korshinskii*; stoichiometry; nutrient accumulation; adaptation strategy; soil factor

生态化学计量学是探索生命体生长与生态过程中众多养分元素的平衡和比例关系的研究^[1-2],其中C、N、P是植物生长发育过程中不可或缺的养分元素,C:N、C:P能反映N、P的利用效率和固碳能力,与植物的生长速率密切相关,N:P值可指示植物受养分元素受限制情况^[3-4],植物体内养分元素的分配特性及作用机制表征植物对环境的适应与响应^[5],植物体内不同器官元素间的养分获取、累积、分配速率的差异可通过异速生长关系来体现,其异速生长指数大小也能反映植物养分趋同或趋异状态^[6-7]。对同一物种而言,研究其不同器官C、N、P及计量比特征与异速生长关系对于理解植物养分分配及适应策略具有重要意义。

人工种植是黄土高原退耕还林区重要的植被恢复措施,但该区种植模式以纯林为主,结构较为单一,生长状况差,导致生产力低下、多样性丧失等诸多生态问题,不利于人工林生态系统的可持续发展^[8]。与纯林相比,混交种植能够有效改善土壤养分含量,从而提高林中树种养分状况,增强林分生产力与稳定性^[9]。目前,关于纯林和混交林与植物生态化学计量相关的研究近年来也有些许报道,如对闽楠纯林及其混交林研究发现,闽楠叶养分元素可塑性受种植方式影响较大,混交种植显著改变了闽楠(*Phoebe bournei*)叶的氮磷含量^[10];对黄土丘陵区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)与刺槐混交林研究结果显示,油松刺槐混交林不仅有效改善土壤碳含量,还能影响刺槐各器官的养分含量^[11];但因研究不同树种、混交类型及不同区域环境等条件研究结果存在巨大差异。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)是黄土高原广泛种植的树种之一,具有耐干旱与贫瘠等多种特征,目前关于柠条锦鸡儿人工林的研究主要集中于水土保持与林地水文效应^[12-13]。植物不同器官内的养分含量与其功能变化、生长环境等密切相关^[14]。近年来,较多研究表明土壤是影响化学计量的关键环境因素^[15],但研究对象多集中于乔木,对于黄土丘陵半干旱地区的不同种植方式下的典型灌木与土壤因子的关系研究较为缺乏。鉴于此,本研究以山西北部黄土丘陵沟壑区柠条锦鸡儿纯林与混交林为研究对象,通过分析柠条锦鸡儿叶、枝化学计量特征及其与土壤因子的关系,探索柠条锦鸡儿养分分配格局与养分累积变化规律,揭示柠条锦鸡儿对环境的适应策略,以期对未来柠条锦鸡儿人工林培育与经营提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于黄土高原北部,属山西省大同市(112°15'E—114°15'E,39°00'N—40°30'N),该地区以丘陵为主,占地面积约为1 177 km²,属温带大陆性季风气候,温差明显,寒干多风,年均气温6.4℃,最低、最高气温分别出现在1月、7月,年均降雨量为400~500 mm,其中以夏季降雨最为集中,占全年降雨量的64%,土壤类型多为红壤。该区属退耕还林区,从2000年开始实施退耕还林,至今退耕年限有20余年,营造了大面积防护林,以人工纯林为主,部分混交林,主要种植的乔木树种有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、刺槐(*Robinia*

pseudoacacia)、油松(*Pinus tabuliformis*)等;灌木主要有柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)等;草本主要有大针茅(*Stipa grandis*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。经踏查,选取外界干扰程度相对较低的试验区域,干扰主要以放牧、人工践踏为主,试验区内的植被完整且生长良好。

1.2 样地设置与样品采集、测定

2020 年 7—8 月在研究区内布设样地,进行群落调查、植物样品取样工作,其中主要调查灌木,为了解林分整体概况,对乔木与草本也进行基本调查;

表 1 林分概况
Table 1 Stand overview

林型	树种	纬度/经度 (N/E)	海拔/m	林龄/a	密度/ (株·hm ⁻²)	株行距/m	郁闭度	株高/m	基径/胸径 (mm)/(cm)
I	柠条锦鸡儿 <i>C. korshinskii</i>	40°14'30" 113°7'26"	1 293	18	3 522±121	1×4	0.6	1.36±0.21	10.18±1.35
II	柠条锦鸡儿 <i>C. korshinskii</i>	40°18'30"	1 275	18	3 047±76	1×4	0.7	1.07±0.21	8.22±1.01
	油松 <i>P. tabuliformis</i>	113°7'52"				3×4		3.01±0.24	9.58±0.24
	柠条锦鸡儿 <i>C. korshinskii</i>	40°18'27"				1×4		1.25±0.18	8.29±1.36
III	樟子松 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	113°8'32"	1 284	18	3 280±58	3×4	0.7	3.11±0.56	9.09±0.41

2021 年 8—12 月进行样品养分含量测定。植物取样与测定:根据测量的柠条锦鸡儿株高、冠幅、基径的数据,经过处理与分析,在每个样地的灌木样方中选取生长良好、无病虫害且接近平均株高、冠幅、基径的标准木一株,伐倒,并用枝剪将植株外、中、内层分别取枝条,完成后将枝叶分离,分离后及时将枝叶放置密封袋内置于阴暗处并做好标记,枝叶样品均为 27 份。将标记好的样品带回实验室用烘箱进行杀青,同时用 65 ℃烘干至恒重,烘干后取出利用研磨器研磨至粉末状,并过 100 目筛后放入密封袋内用于测量养分元素含量。每份样品测定同一指标重复 3 次,C 含量采用重铬酸钾高温-外加热法测定^[16];N、P 含量采用 AA3-连续流动分析仪测定^[17]。

土壤取样与测定:采用五点取样法对土壤取样。物理性质测定:环刀取土,保持原状土,用于测定土壤容重(SBD),及时带回实验室用烘干法测定土壤含水量(SWC)。化学性质测定:用土钻钻取表层(0~20 cm)土壤样品混合均匀,共 27 份土壤样品,及时带回实验室进行处理。酸度计法测定土壤 pH,土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)测定方法与植物相同,但注意样品量与药品量的差异性。

1.3 数据处理

所有数据用 Excel 2019 进行归纳整理。统计

本研究选取的是林龄相近且立地条件较为一致的柠条锦鸡儿纯林(I)、樟子松+柠条锦鸡儿混交林(II)、油松+柠条锦鸡儿混交林(III)3 种类型人工林(以下简称柠条锦鸡儿纯林,樟柠混交林,油柠混交林),其中混交林为乔木与灌木隔行混交种植,行间距大致相同,总体密度基本一致,见表 1。样地大小设为 20 m×20 m,每种类型人工林设置 3 个独立采样点,每个采样点设置 3 个重复,共 27 个样方,在样方四点及中心设置 5 m×5 m 的小样方,在设置好的小样方内对柠条锦鸡儿进行测量,包括株高、冠幅、基径等,林分基本概况见表 1。

分析采用 SPSS 21.0 软件,利用单因素方差(Duncan 法)对枝叶 C、N、P 及计量比进行差异性分析与检验;种植方式和器官及交互作用对化学计量的影响采用双因素方差分析及检验;对化学计量与土壤因子进行 Pearson 相关性分析;采用 origin2019 对叶枝化学计量与土壤因子进行主成分分析(PCA),并作图;

采用 SMATR 分析 C、N、P 含量的异速比例关系,常用幂函数 $Y=aX^b$ 表示,线性转换后为 $\log Y=\log a+b\log X$,本研究中 X、Y 为植物养分元素 C、N、P,loga 表示标准化常数,b 表示标准化回归斜率,通过比较拟合方程的斜率 b 与 1.0 的差异性来判断两元素之间的比例关系,当 |b|=1 时,两元素间为等速比例关系,当 |b| 大于或者小于 1 时,可认为 Y 累积速率大于或者小于 X 的累积速率,为异速比例关系。

2 结果与分析

2.1 柠条锦鸡儿叶、枝生态化学计量特征

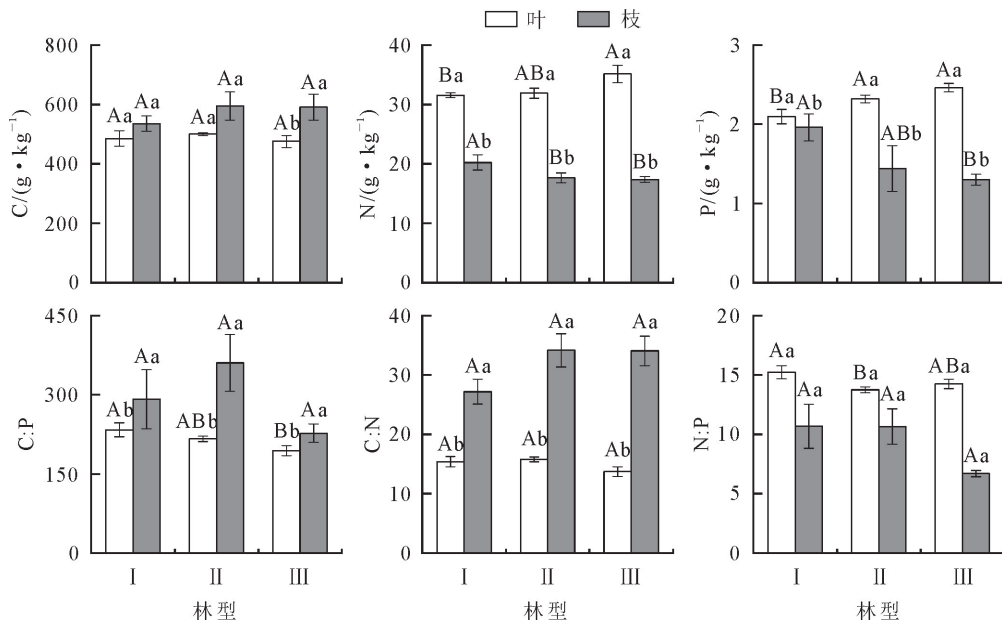
柠条锦鸡儿叶枝 C、N、P 及其计量比如图 1 所示,从不同种植方式来看,油柠混交林内叶 N 含量最高,与纯林相比显著提高了 10.2%,樟柠与油柠混交林叶 P 含量分别显著提高了 9.6%、14.8%;叶

C : P、N : P 值均为混交林中低,相比纯林,油柠混交林中叶 C : P 显著降低了 12.1%,樟柠混交林叶 N : P 显著降低了 10.4%;柠条锦鸡儿叶 C、C : N 在纯林与混交林间无显著差异。

柠条锦鸡儿枝 N、P 含量均为混交林中低,与纯林相比,樟柠、油柠混交林枝 N 含量分别降低了 5.5%、4.5%,油柠混交林枝 P 含量显著降低了

12.1%;柠条锦鸡儿枝 C、C : P、C : N、N : P 在纯林与混交林间无显著差异。

从不同器官来看,只有油柠混交林内枝叶间 C 含量有显著差异,具体表现为枝>叶;柠条锦鸡儿纯林、樟柠、油柠混交林中枝叶 N、P 大小关系均为叶>枝,C : P、C : N 表现为枝>叶;N : P 在枝叶间无显著差异。



不同大写字母表示叶(枝)在 I、II、III 间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一林型内不同器官间差异显著($P<0.05$)。I: 柠条锦鸡儿纯林; II: 樟子松+柠条锦鸡儿; III: 混交林油松+柠条锦鸡儿混交林。下同。

图 1 不同种植方式下柠条锦鸡儿枝叶 C、N、P 及计量比特征

Fig.1 Characteristics of C,N,P and stoichiometric ratio in branches and leaves of *Caragana korshinskii* under different planting patterns

种植方式、器官及其交互作用对柠条锦鸡儿 C、N、P 及计量比影响各不相同,由表 2 可以看出,除 C、C : P 受三者影响不显著外,其余指标均受显著影响,其中,种植方式、器官及其交互作用对柠条锦

鸡儿 N、C : N 含量影响显著,种植方式及器官对 P、N : P 的影响均达到了显著水平。总的来说,C、N、P 及其计量比受种植方式与器官影响较大,受种植方式与器官交互作用影响较小。

表 2 种植方式、器官对 C、N、P 及计量比的双因素方差分析(F 值)

Table 2 Two-factor ANOVA on C,N,P and stoichiometric ratios by planting pattern and organ

因素	C	N	P	C : P	C : N	N : P
种植方式	1.892	1.026 *	10.100 *	2.459	11.693 *	2.231 * *
器官	1.900	297.481 * *	44.397 *	28.137	91.608 * *	16.118 * *
种植方式×器官	0.350	5.906 * *	5.042	1.165	10.581 *	0.337

注: * 表示 $P<0.05$; * * 表示 $P<0.01$ 。下同。

2.2 柠条锦鸡儿 C、N、P 异速比例关系

由表 3 可以看出,除 N-P 为等速比例关系外,纯林与混交林中 C-N、C-P 均为斜率>1 的异速比例关系,表明 C 的累积速率显著大于 N、P 的累积速率。进一步比较其异速方程的斜率,养分元素两两关系在纯林与混交林间无显著差异。

从不同器官来看,柠条锦鸡儿叶的 C-N、C-P 均呈现异速生长指数>1 的异速比例关系,表明柠条锦鸡儿叶的 C 的累积速率要大于 N、P 的累积速率;

而枝的 C-N、C-P 的斜率与 1 无显著差异,呈等速比例关系,表明枝的 C 的减小比率与 N、P 的增加比率大致相同;叶与枝的 N-P 大体上呈现等速比例关系。叶 C-N、C-P 关系的斜率显著大于枝,表明叶的 C 分配速率显著高于枝,而 N、P 分配速率在枝叶间无明显差异。

2.3 土壤因子对柠条锦鸡儿 C、N、P 及计量比的影响

图 2A、图 2B 中前 2 个主成分累积方差贡献率

含量及比例分布均与种植方式有明显相关性,与纯林相比,混交林内叶与枝 P 含量更高,这与 SOC、TN、SOC 密切相关,表明植物养分及比例受不同种植方式下的土壤差异性的影响。

Table 3 Differential relationship between C,N and P of *C. korshinskii* under different forest types

注:不同小写字母表示不同林分间差异显著($P<0.05$)。95% CI 表示 95% 置信区间, $P<0.05$ 表明为异速生长关系。下同。

Table 4 Differential relationship between C,N and P of branches and leaves of *C. korshinskii*

注:不同小写字母表示不同器官间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 2 Leaf and branch stoichiometry and soil factor PCA analysis

相关, LN: P 与 SBD、TN 呈显著负相关。枝与部分土壤因子呈现显著相关性, BNC 与 SWC、SBD 呈显著负相关, BPC 与 SOC 呈显著正相关, BCC、BC: P、BC: N 均与 TP 呈显著正相关关系。总体来看, 叶 C、N、P 及计量比容易受到 SWC 的及土壤养分的影响; 枝 C、N、P 及计量比更容易受到 TP 的影响。

表 5 叶化学计量与土壤因子相关性分析

Table 5 Correlation analysis between leaf stoichiometry and soil factors

统计值	LCC	LNC	LPC	LC : P	LC : N	LN : P
SWC	-0.132	0.315 *	0.366 *	-0.385 *	-0.228	-0.243
SBD	0.117	-0.037	0.316 *	-0.160	0.119	-0.459 *
pH	0.190	-0.162	-0.001	0.125	0.305 *	-0.201
SOC	0.301 *	-0.076	0.098	0.146	0.320 *	-0.200
TN	0.151	0.013	0.266	-0.105	0.111	-0.342 *
TP	0.047	0.395 *	0.313 *	-0.143	-0.190	0.088

表 6 枝化学计量与土壤因子相关性分析

Table 6 Correlation analysis between branch stoichiometry and soil factors

统计值	BCC	BNC	BPC	BC : P	BC : N	BN : P
SWC	0.158	-0.421 *	-0.313	0.261	0.350	-0.195
SBD	0.151	-0.396 *	-0.085	0.188	0.328	-0.312
pH	-0.041	0.109	-0.109	0.021	-0.043	0.139
SOC	0.058	-0.118	0.406 *	-0.092	0.142	-0.355
TN	0.055	-0.272	-0.127	0.104	0.195	-0.158
TP	0.396 *	-0.226	-0.361	0.522 * *	0.422 *	0.021

3 结论与讨论

3.1 结论

柠条锦鸡儿枝叶 C、N、P 及计量比在纯林与混交林间存在差异,混交林显著提高了叶的 N、P 含量;纯林内叶受 N、P 限制;与纯林相比,樟柠混交种植有效缓解了 P 限制,据此建议未来种植柠条锦鸡儿时选择其与乔木混交种植平衡养分,促进人工林良好生长,同时在其生长发育阶段通过适当施加 N 肥来缓解环境 N 限制。

器官对柠条锦鸡儿养分分配影响较大,N、P 含量总体表现为叶>枝,而 C:P、C:N 则表现为枝>叶,枝叶功能各异,叶较枝更需要养分元素以快速生长,是柠条锦鸡儿适应该地区环境的养分分配策略。

柠条锦鸡儿 C-P、C-N、N-P 异速比例关系较稳定,种植方式会影响柠条锦鸡儿 C、N、P 及计量比,但不会改变柠条锦鸡儿 C、N、P 的特定耦合比例。柠条锦鸡儿 C 的累积速率大于 N、P 的累积速率,N-P 在枝叶间关系相同,枝叶对 N、P 投资的具有一致性。

在不同种植方式下柠条锦鸡儿叶、枝 P 含量受 SWC、SOC、TP 的影响明显;叶比枝更易受土壤因子的影响,叶 C、N、P 及计量比主要受 SWC、TP、SOC 的影响,枝 C、N、P 及计量比主要受 TP 的影响。

3.2 讨论

3.2.1 柠条锦鸡儿 C、N、P 及计量比变化特征 本研究中柠条锦鸡儿叶 N、P 含量为混交林中较高,与纯林相比,乔灌混交林群落结构层次分明,在可利用的有效辐射下吸收更多 N、P 促进光合效率最大

化^[18];此外,混交林地凋落物积累量较纯林大,土壤表层微生物更活跃,养分积累明显利于叶片吸收^[19]。而 C 含量较稳定,C 元素作为植物用于储存干物质的主要结构元素,受遗传物质影响较明显^[20],基本不受器官与种植方式的影响。N、P 分配到叶中较多,而 C:P、C:N 则为枝>叶,在植物受 N、P 限制下,植物会在光合作用效率最大的器官投入更多 N、P 元素保证光合效益^[21],提升新陈代谢速率。

本研究中混交林中柠条锦鸡儿叶 C:P 值低,表明油柠混交种植加速了其生长;根据 N:P 限制理论^[22],纯林中叶 N:P 为 15.23 ($14 < 15.23 < 16$),受 N、P 共同限制,而樟柠混交林 N:P 为 13.75 ($13.75 < 14$)只受土壤 N 限制,油柠混交林叶 N:P 为 14.24, > 14 ,混交林内植物丰富的根系能够有效疏松土壤,土壤中难以释放的有机物质因根系对土壤的疏松作用变得更为活跃^[23],左巍等^[24]对针叶纯林与针阔混交林地表凋落物养分研究发现,针叶林地表凋落物含磷量为阔叶林的 1.26 倍,樟子松叶中碳含量较油松高^[25],富含高碳的凋落物能够释放更多的磷酸盐^[26],因此混交林内不仅利于土壤 P 含量积累,还能促进植物吸收更多的 P,有效缓解 P 限制。

3.2.2 柠条锦鸡儿 C、N、P 异速比例关系 本研究中柠条锦鸡儿 C-P、C-N、N-P 异速比例关系在纯林与混交林间无显著差异,表明柠条锦鸡儿会按照一定比例吸收 C、N、P,养分元素之间的关系不会随种植方式的不同而改变。从养分累积角度来说,柠条锦鸡儿 C 的累积速率高于 N、P 的累积速率,这与蔡

年辉等^[27]对云南松(*Pinus yunnanensis*)养分累积速率关系研究结果存在差异,不同物种生存策略不同存在一定的种间差异^[6],柠条锦鸡儿需要不断积累且更快速的积累碳增强自身防御能力。

本研究中柠条锦鸡儿 C 与 N、P 异速比例关系在枝叶之间存在显著差异,这与多数研究结果不一致^[6],可能是因为柠条锦鸡儿枝叶对于养分元素利用规律的并不相似,会因为各器官生长发育不同而产生较大差异,同时也与研究树种为幼龄树密切相关,此发育阶段的树种正处于快速生长阶段,需要累积大量的碳用于储存和增长生物量^[28]。同一树种不同器官对养分的利用及需求不同,因此不同器官间养分元素间的关系各异^[29],与枝相比,叶 C 与 N、P 的比值较低,异速指数较大,叶需要更多的 C 来增加叶片建成,使其具有较大的叶干物质含量与叶厚度,以防止过多的水分蒸发损耗水分^[30]。对于 N-P,无论是在不同种植方式下还是枝叶之间,均表现为等速比例关系,表明 N、P 元素累积速率大致相同,从侧面反映出枝叶对 N、P 投资的一致性,本研究区属黄土丘陵区,土壤破碎瘠薄,N、P 含量匮乏,是柠条锦鸡儿生长的限制性因素。

3.2.3 柠条锦鸡儿 C、N、P 及计量比与土壤因子的关系 本研究中叶与枝 P 均在不同种植方式下表现出对 SWC、TP、SOC 的显著相关性,与灌木纯林相比,混交林中乔木冠层能够截获部分光照,维持林内的湿度^[31],土壤水分蒸发率降低,土层表面凋落物量大且覆盖度高,可有效改善土壤团聚体与微生物群落结构,提高代谢速率,促进凋落物分解,改善土壤养分^[9,31-32],利于植物吸收,植物体内 P 又与土壤磷直接相关,土壤 N 丰富能够活跃土壤磷酸酶^[33],促进柠条锦鸡儿对磷的吸收,土壤有机碳与土壤 P 两者相互促进,有机 C 促进 P 的释放,P 元素促进有机 C 的积累^[26,34],因此柠条锦鸡儿枝叶养分与土壤因子的关系在不同种植方式下表现明显。

本研究中叶的养分含量与土壤多种因子呈现相关性,相比枝,植物叶更敏感,容易受到土壤因子的影响,结果显示,叶 N、P 分别与 SWC、TP 呈显著正相关关系,叶 C:C:N 与 SOC 呈现显著正相关关系,这与郁国梁等^[35]研究一致,本研究处于黄土丘陵区,沟壑纵横,水分匮乏,而水分胁迫会与土壤养分减少、pH 的增大同步变化,在土壤水分胁迫下,植物通常会增大干物质含量,采取缓慢生长的策略,利用 N、P 合成核酸与有机物储存体内,减少水分蒸散及维持养分^[36],增强对不良环境的适应能力。枝易受 TP 的影响,枝 C:C:P:C:N 均与 TP 呈显著正相关关系,P 是直接参与植物光合磷酸化与氧化

磷酸化的重要元素,枝条作为运输营养物质的重要器官^[37],转移磷元素参与组织代谢活动不可或缺,磷含量高低通过影响参与光合与叶绿素荧光过程的嫩枝与绿色叶片影响氮元素等其他元素的吸收。

参考文献:

- [1] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 等. 中国典型生态脆弱区生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4213-4225.
CHEN Y, LI Y Q, WANG X Y, et al. Advances in ecological stoichiometry in typically and ecologically vulnerable regions of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4213-4225. (in Chinese)
- [3] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
ZENG Z X, WANG K L, LIU X L, et al. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of Northwest Guangxi[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(7): 682-693. (in Chinese)
- [4] LUO X, HOU E, CHEN J, et al. Dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometry resulting from conversion of primary broadleaf forest to plantation and secondary forest in subtropical China[J]. Catena, 2020, 193(C). doi:10.1016/j.catena.2020.104606.
- [5] HU Y F, SHU X Y, HE J, et al. Storage of C, N, and P affected by afforestation with *Salix cupularis* in an alpine semiarid desert ecosystem[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(1): 188-198.
- [6] 闫景明, 张世航, 汪漫, 等. 濒危植物大别山五针松枝叶 NPK 化学计量特征季节动态[J]. 植物研究, 2021, 41(3): 395-407.
YAN J M, ZHANG S H, WANG M, et al. Seasonal dynamics of N, P, and K stoichiometry in twigs and needles of *Pinus dabeshanensis*, an endangered gymnosperm species[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(3): 395-407. (in Chinese)
- [7] DI T, ZHENG B Y, J N K, et al. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent[J]. National Science Review, 2018, 5(5): 728-739.
- [8] 查美琴, 成向荣, 虞木奎, 等. 不同混交比例对杉木和大叶榉幼苗功能性状的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8556-8567.
ZHA M Q, CHENG X R, YU M K, et al. Effects of mixing proportion on functional traits of *Cunninghamia lanceolata* and *Zelkova schneideriana* seedling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8556-8567. (in Chinese)
- [9] HAO N L, ZHONG J M, XIAO H D, et al. Soil properties under artificial mixed forests in the desert-Yellow River Coastal Transition Zone, China[J]. Forests, 2022, 13(8): 1174-1174.
- [10] 孙嘉伟, 罗丽莹, 李淑英, 等. 闽楠叶片功能性状及表型可塑性对其与杉木混交的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2855-2866.
SUN J W, LUO L Y, LI S Y, et al. 2021. Response of *Phoebe*

- bournei* leaf functional traits and phenotypic plasticity to its mixture with the Chinese fir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2855-2866. (in Chinese)
- [11] 焦秋燕, 黄林嘉, 张娟娟, 等. 黄土丘陵沟壑区刺槐混交林生态化学计量特征与碳储量[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 238-246.
- JIAO Q Y, HUANG J L, ZHANG J J, *et al.* Ecological stoichiometry and carbon storage of *Robinia pseudoacacia* mixed forests in the hilly-gully area of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 238-246. (in Chinese)
- [12] 武昱鑫, 余新晓, 彭修文, 等. 冬奥会崇礼赛区 5 种人工林枯落物及土壤水文特征[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(4): 66-75.
- WU Y X, YU X X, PENG X W, *et al.* Hydrological characteristics of litter and soil of five types of plantation configuration patterns in the Chongli Competition District of Winter Olympic Games[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(4): 66-75. (in Chinese)
- [13] 张文文, 郭忠升, 宁婷, 等. 黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 725-732.
- ZHANG W W, GUO Z S, NING T, *et al.* The effects of plant density on soil water and plant growth on semi-arid loess hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 725-732. (in Chinese)
- [14] WESTOBY M, FALSTER D S, MOLES A T, *et al.* Plant Ecological Strategies: Some leading dimensions of variation between species[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 125-159.
- [15] 董从国, 乔雨宁, 曹扬, 等. 黄土高原不同植被带油松人工林生态化学计量特征及其影响因素[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 1-8.
- DONG C G, QIAO Y N, CAO Y, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics and its influential factors in *Pinus tabulaeformis* plantation under different vegetation zones in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 1-8. (in Chinese)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agricultural chemical analysis[M]. Third edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [17] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, *et al.* A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.
- [18] 曹嘉瑜, 刘建峰, 袁泉, 等. 森林与灌丛的灌木性状揭示不同的生活策略[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(7): 715-729.
- CAO J Y, LIU J F, YUAN Q, *et al.* Traits of shrubs in forests and bushes reveal different life strategies[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(7): 715-729. (in Chinese)
- [19] 朱潮, 武利玉, 张崇庆, 等. 兰州市北山典型侧柏人工林分叶片与土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 361-368.
- ZHU C, WU L Y, ZHANG C Q, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of leaves and soil in a typical *Platycladus orientalis* plantation in Beishan of Lanzhou city[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 361-368. (in Chinese)
- [20] 张天霖, 邱治军, 吴仲民, 等. 粤北针阔混交林不同器官碳氮磷钾的生态化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 149-157.
- ZHANG T L, QIU Z J, WU Z M, *et al.* Eco-stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium of different organs in the mixed coniferous and broad-leaved forest in Northern Guangdong[J]. *Forest Research*, 2021, 34(2): 149-157. (in Chinese)
- [21] MO Q, LI Z A, SAYER E J, *et al.* Foliar phosphorus fractions reveal how tropical plants maintain photosynthetic rates despite low soil phosphorus availability[J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(3): 503-513.
- [22] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [23] 吴旭, 牛耀彬, 陈云明, 等. 黄土丘陵区沙棘混交林叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 369-376.
- WU X, NIU Y B, CHEN Y M, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics in leaf, litter and soil at mixed forests of *Hippophae rhamnoides* in the Loess Hilly Region of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 369-376. (in Chinese)
- [24] 左巍, 贺康宁, 田赞, 等. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2271-2278.
- ZUO W, HE K N, TIAN Y, *et al.* Surface litter stoichiometry for five forest types in alpine region, Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2271-2278. (in Chinese)
- [25] 于丰源, 张金鑫, 孙一荣, 等. 科尔沁沙地主要造林树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 比较研究[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(4): 179-187.
- YU F Y, ZHANG J X, SUN Y R, *et al.* Leaf $\delta^{13}\text{C}$ of the main afforestation tree species in Horqin sandy land[J]. *Forest Research*, 2022, 35(4): 179-187. (in Chinese)
- [26] CHARLOTTE V, PIETERJAN K, DIRK R, *et al.* Increasing soil organic carbon content can enhance the long-term availability of phosphorus in agricultural soils[J]. 2021, 73(1): 1365-2389.
- [27] 蔡年辉, 唐军荣, 车凤仙, 等. 平茬高度对云南松苗木碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 42(5): 849-857.
- CAI N H, TANG J R, CHE F X, *et al.* Effects of stumping height on carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry in different organs of *Pinus yunnanensis* seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 42(5): 849-857. (in Chinese)
- [28] 陈东升, 孙晓梅, 金英博, 等. 林龄和竞争对日本落叶松各组分生物量异速关系的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 843-853.
- CHEN D S, SUN X M, JIN Y B, *et al.* Effects of stand age and competition on allometric relationships for biomass partitioning in *Larix kaempferi* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 843-853. (in Chinese)

- [29] HUI Y, HONGWEI Z, BO Z, *et al.* Stoichiometry of C:N:P in the roots of *Alhagi sparsifolia* is more sensitive to soil nutrients than aboveground organs[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12(1): 698961-698961.
- [30] 程雯, 喻阳华, 熊康宁, 等. 喀斯特高原峡谷优势种叶片功能性状分析[J]. *广西植物*, 2019, 39(8): 1039-1049.
- XHENG W, YU Y H, XIONG K N, *et al.* Leaf functional traits of dominant species in Karst plateau-canyon areas[J]. *Guihaia*, 2019, 39(8): 1039-1049. (in Chinese)
- [31] 王青天. 福建柏与马尾松混交造林模式的环境效应与生长分析[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(3): 126-130.
- WANG Q T. Environmental effects and growth analysis of the mixed forest plantations of *Fokienia hodginsii* and *Pinus massoniana* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(3): 126-130. (in Chinese)
- [32] 胡靛达, 李远发, 周海菊, 等. 细叶云南松混交林土壤微生物群落功能特性及与林分结构关系的研究[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 16-23.
- HU L D, LI Y F, ZHOU H J, *et al.* Relationships between soil microbial community function and stand structure of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* mixed forests[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 16-23. (in Chinese)
- [33] 杨瑞, 刘帅, 王紫泉, 等. 秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 1037-1046.
- YANG R, LIU S, WANG Z Q, *et al.* Relationships between the soil Enzyme activity and soil nutrients in forest soils typical of the Qinling Mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 1037-1046. (in Chinese)
- [34] 张社奇, 王国栋, 田鹏, 等. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2004(6): 128-131.
- ZHANG S Q, WANG G D, TIAN P, *et al.* Distributive feature of soil microorganism of *Robinia pseudoacacia* L. plantation forestland in Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(6): 128-131. (in Chinese)
- [35] 郁国梁, 王军强, 马紫荆, 等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子[J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(5): 9-18.
- YU G L, WANG J Q, MA Z J, *et al.* Seasonal dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of leaves of dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake and their influencing factors[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2022, 31(5): 9-18. (in Chinese)
- [36] 刘润红, 白金连, 包含, 等. 桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 828-841.
- LIU R H, BAI J L, BAO H, *et al.* Variation and correlation in functional traits of main woody plants in the *Cyclobalanopsis glauca* community in the Karst hills of Guilin, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(8): 828-841. (in Chinese)
- [37] ZIACO E, LIANG E. New perspectives on sub-seasonal xylem anatomical responses to climatic variability[J]. *Trees*, 2019, 33(4): 973-975.
- (上接第28页)
- [27] 徐道炜, 刘金福, 何中声, 等. 毛竹向杉木林扩张对土壤活性有机碳及碳库管理指数影响[J]. *西部林业科学*, 2019, 48(5): 22-28, 36.
- XU D W, LIU J F, HE Z S, *et al.* Effect of phyllostachys edulis to *Cunninghamia lanceolata* forest on soil active organic carbon and carbon management index[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48(5): 22-28, 36. (in Chinese)
- [28] 葛露露, 何宗明, 林宇, 等. 滨海沙地不同树种人工林生物量及凋落物碳氮养分归还[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 39-46.
- GE L L, HE Z M, LIN Y, *et al.* Biomass and litter carbon and nitrogen return of different plantations in the sandy coastal plain area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 39-46. (in Chinese)
- [29] 张淑香, 张文菊, 徐明岗. 土壤活性有机碳的影响因素与综合分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1178-1179.
- ZHANG S X, ZHANG W J, XU M G, *et al.* Influencing factors and comprehensive analysis of soil active organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6): 1178-1179. (in Chinese)
- [30] GE T D, WU X H, CHEN X J, *et al.* Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO₂ in China subtropical upland and paddy soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 113(1): 70-78.
- [31] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 133-140.
- TIAN S Z, WANG Y, ZHANG Y F, *et al.* Residue returning with subsoiling replacing rotary tillage improving aggregate and associated carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 133-140. (in Chinese)
- [32] 王迪, 吴新亮, 蔡崇法, 等. 长期培肥下红壤有机碳组成与团聚体稳定性的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 61-70.
- WANG D, WU X L, CAI C F, *et al.* Composition of organic carbon and their relationship with aggregate stability in red soil under different fertilizer application[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1): 61-70. (in Chinese)
- [33] CATES A M, RUARK M D, HEDTCKE J L, *et al.* Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 371-380.
- [34] 王小沁, 陈玉雯, 孙辉, 等. 川西高山树线交错带海拔梯度上土壤有机碳稳定性特征[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 1-7.
- WANG X Q, CHEN Y W, SUN H, *et al.* Stabilization of soil organic carbon in alpine treeline ecotone along altitudinal gradient in the west of Sichuan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 1-7. (in Chinese)