

## 山西西南部黄土丘陵区典型林分生态化学计量特征

辛鹏程<sup>1</sup>, 魏天兴<sup>1</sup>, 陈宇轩<sup>2</sup>, 于欢<sup>1</sup>, 沙国良<sup>1</sup>, 郭鑫<sup>1</sup>, 任康<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 2. 国际竹藤中心 国家林业和草原局北京市共建竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102)

**摘要:** 【目的】研究黄土丘陵区典型林分植物-凋落物-土壤的生态化学计量特征, 可揭示该地区生态系统植被生长发育的主要限制性营养元素。【方法】选取黄土丘陵区典型人工油松 *Pinus tabulaeformis* 林、刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林、侧柏 *Platycladus orientalis* 林为研究对象, 天然次生辽东栎 *Quercus liaotungensis* 林为对照, 分析不同林分植物叶、枝、根, 凋落物和土壤的生态化学计量特征及其相关性。【结果】①典型林分的乔木各器官碳(C)、氮(N)、磷(P)质量分数从大到小依次表现为叶、枝、根, 与C相比, 各器官间N、P质量分数变化幅度较大; 油松各器官C质量分数显著高于其他林分 ( $P < 0.05$ ); 刺槐叶、根、凋落物和土壤N质量分数显著高于其他林分 ( $P < 0.05$ ), 刺槐具有较好的固氮作用。②刺槐叶C/N和C/P显著低于其他林分 ( $P < 0.05$ ), 叶N/P为14~16, 其他林分叶N/P均低于14; 凋落物N/P低于25, 分解受N元素限制; ③典型林分的植物各器官C、N与凋落物C、N显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而P与凋落物和土壤P无显著相关性; 土壤C与凋落物C呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 而与凋落物N呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 凋落物C/N、C/P与土壤C/N、C/P、N/P分别呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。【结论】黄土丘陵区典型林分植物生长发育和凋落物的分解主要受N元素限制。刺槐具有良好的固氮作用且生长速率较快, 在该地区人工林植被恢复中可着重选择和保护。图3表1参30

**关键词:** 生态化学计量; 人工林; 养分循环; 养分限制

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)00-0001-08

## Ecological stoichiometric characteristics of typical forest stands in the Loess Hilly Region of southwest Shanxi

XIN Pengcheng<sup>1</sup>, WEI Tianxing<sup>1</sup>, CHEN Yuxuan<sup>2</sup>, YU Huan<sup>1</sup>, SHA Guoliang<sup>1</sup>, GUO Xin<sup>1</sup>, REN Kang<sup>1</sup>

(1. Jixian Research Station for Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Research Network, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration/Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

**Abstract:** [Objective] This study, with an investigation of the ecological stoichiometry characteristics of plant-litter-soil in typical forest stands in the Loess Hilly Region of China, is aimed to reveal the main limiting nutrient elements for the growth and development of vegetation in the ecosystem in this region. [Method] With a natural secondary forest of *Quercus liaotungensis* as the control, a systematic analysis was conducted of the ecological stoichiometric characteristics and their correlation between tree leaves, branches, roots, litter and soil in the forest of *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* in Loess Hilly Region. [Result] (1) The overall contents of C, N and P in different organs in typical stands were leaves > branches > roots, and compared with C content, the content of N and P varied greatly between different

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300401)

作者简介: 辛鹏程 (ORCID: 0009-0005-2376-9706), 从事水土保持和林业生态工程研究。E-mail: xpc181113@bjfu.edu.cn. 通信作者: 魏天兴 (ORCID: 0000-0001-6276-1655), 教授, 博士, 博士生导师, 从事水土保持、流域自然地理过程、生态修复等研究。E-mail: weitx@bjfu.edu.cn

organs with the C content of *P. tabuliformis* organs being substantially higher than other forest stands ( $P < 0.05$ ) and the N contents of leaves, roots, litter and soil of *R. pseudoacacia* being significantly higher than other forest stands ( $P < 0.05$ ). (2) *R. pseudoacacia* leaf C/N and C/P were significantly lower than other forest stands ( $P < 0.05$ ), with N/P being between 14 and 16, while leaf N/P of all other stands was lower than 14 and litter N/P was lower than 25. (3) C and N contents of all plant organs in typical stands were prominently positively correlated with litter C and N content ( $P < 0.05$ ), while plant P was significantly negatively correlated with litter and soil P content; soil C content was significantly negatively correlated with litter C content ( $P < 0.05$ ) but positively correlated with litter N content ( $P < 0.05$ ) and there was a significant negative correlation between litter C/N, C/P and soil C/N, C/P and N/P respectively ( $P < 0.05$ ). [Conclusion] Plant growth and development and litter decomposition in typical stands in the loess hills were mainly limited by N. And *R. pseudoacacia* forests should be selected and protected in the vegetation restoration in the Loess Hilly Region as its growth rate is the highest and the litter is easier to decompose. [Ch, 3 fig. 1 tab. 30 ref.]

**Key words:** ecological stoichiometry; plantation; nutrient cycling; nutrient limitation

生态化学计量学主要关注生物地球化学循环过程中营养元素间的相互作用与平衡<sup>[1]</sup>,从植物生态学、土壤学等多学科角度探究植物器官、物种、群落和生态系统的元素计量关系和规律,广泛用于判断植物体和群落的养分限制状况<sup>[2]</sup>、指导生态系统养分管理<sup>[3]</sup>、预测全球养分变化背景下的植被动态研究<sup>[4]</sup>。植物-凋落物-土壤是陆地生态系统重要的养分储存库,三者之间彼此影响和制约。植物养分输移活动通过叶片从大气中固定碳(C),依靠枝在植物各器官间进行养分运转,借助根系吸收和存储土壤中的养分,最后以凋落物淋溶、光降解、微生物分解和根系分泌等方式将C、氮(N)、磷(P)等元素归还土壤<sup>[5]</sup>,因此,以上循环形成了植物-凋落物-土壤的C、N、P生态系统组分连续体,其关联性有助于深入认识植被各组分对营养元素的利用与分配规律。目前,研究多集中在区域土壤与植物单一器官(叶片)的生态化学计量比研究,如梁楚欣等<sup>[6]</sup>探究了滇东石漠化区不同植被恢复模式下土壤C、N、P质量分数及化学计量比的差异,王浩伊等<sup>[7]</sup>研究了大兴安岭不同生活型针叶生态化学计量与生长阶段的关系,而对于植物多器官(叶、枝、根)-凋落物-土壤为整体的相关研究较少。因此,阐明植物-凋落物-土壤生态系统养分循环及调控机制,可揭示生态系统植物-凋落物-土壤之间的物质循环特征。黄土高原生态环境敏感,独特的地貌导致水土流失严重<sup>[8]</sup>。植被恢复能有效防治水土流失,随着人工恢复为主的“退耕还林还草”工程的实施<sup>[9]</sup>,黄土高原植被覆盖率、土壤质量明显提升,形成了自然恢复和人工恢复为主的植被类型<sup>[10]</sup>。以往对黄土高原植被恢复的生态化学计量研究,集中在单一树种不同器官<sup>[11]</sup>、不同密度人工林土壤<sup>[12]</sup>等方面,关于不同植被恢复类型下植物各器官生态化学计量特征、凋落物与土壤生态化学计量特征关系的研究仍较少。鉴于此,为系统了解植被恢复过程中植物与土壤的生态过程,本研究以黄土丘陵区人工恢复植被油松 *Pinus tabuliformis* 林、刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林、侧柏 *Platycladus orientalis* 林为研究对象,以自然恢复植被辽东栎 *Quercus liaotungensis* 天然次生林为对照,系统研究乔木叶、枝、根,凋落物和土壤生态化学计量特征,揭示黄土高原生态系统的生态过程、养分循环和限制因素,为黄土高原人工林植被恢复工作和森林经营改造提供科技支撑。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地的蔡家川流域(35°53'~36°21'N, 110°27'~110°07'E),该区地处黄土高原东南部半湿润地区,属于典型的黄土残塬沟壑区,季风气候显著,年平均气温为10℃,年平均降水量为579mm,年平均蒸发量达1729mm,降水集中在6—9月,海拔为400~1820m。本研究选取蔡家川流域具有典型代表性的人工油松林、刺槐林、侧柏林、辽东栎天然次生林,林下植物主要为丁香 *Syringa oblata*、黄刺玫 *Rosa xanthina*、绣线菊 *Spiraea salicifolia*、青蒿 *Artemisia caruifolia*、连翘 *Forsythia suspensa*、楝木 *Cornus macrophylla*、糙苏 *Phlomis*

*umbrosa*、紫菀 *Aster tataricus* 等。自 1991 年起，在蔡家川流域内进行退耕还林的全面植被恢复工作，流域内梁峁坡沟综合规划设计，营造人工林，保护天然林，栽植了油松、刺槐及侧柏等适应性强、耐干旱瘠薄的树种，该人工林为生态公益林，没有进行间伐、施肥等人工经营措施，天然林采取自然恢复的方式。研究区样地基本特征见表 1。

表 1 研究区样地基本特征

林分	海拔/m	坡度/(°)	坡向	平均树高/m	平均胸径/cm	凋落物厚度/cm	郁闭度/%	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )
油松林	1 147	20	北向	10.5	14.0	2.4	50	1 680
刺槐林	1 123	7	东向	10.5	12.9	2.9	71	1 310
侧柏林	1 186	14	西北向	7.5	8.4	1.0	49	1 200
辽东栎林	1 141	25	东南向	9.3	11.2	3.1	67	1 150

## 1.2 样品采集与处理

于 2022 年 7—8 月进行外业调查。在每个长势良好的人工油松林、刺槐林、侧柏林和天然次生林辽东栎林等典型样地，分设 3 个乔木样方 (20 m×20 m)，在样方内进行每木检尺，调查郁闭度、树高和胸径等指标。样方内挑选 3 株长势均匀的标准木，在树冠处同一层东、西、南、北 4 个方位采集健康成熟的叶片与细枝 (直径 < 2 cm)，在标准木的冠幅范围内随机钻取 3 个 0~60 cm 的土芯，用冲洗法获取根样品 (直径 < 2 mm)，分别混匀后装入塑封袋；在样方内按对角线法选取 3 个 1 m×1 m 的具有代表性的凋落物样方，采集枯枝落叶 (未分解、半分解和已分解)，混匀后装入塑封袋；五点取样法采集 0~20 cm 土层土壤样品，混匀后装入塑封袋。以上采集的样品带回实验室后，叶、枝、根在 100 °C 杀青 15 min，随后降温至 65 °C 恒温，将叶、枝、根与凋落物烘干至恒量，粉碎，过 0.15 mm 筛。土壤样品自然风干后，研磨过 0.25 mm 筛。采用元素分析仪测定全碳、全氮，采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定全磷。

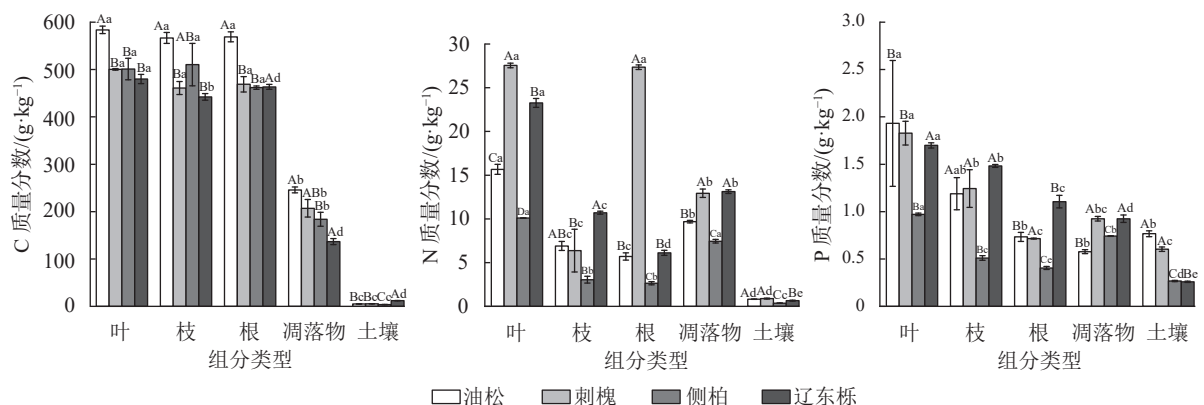
## 1.3 数据处理

采用 SPSS 25.0 对数据进行 K-S 检验，验证数据正态性；采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较不同林分类型及不同组分生态化学计量差异；经方差齐性检验，使用最小显著性差异法 (LSD) 进行显著性检验 ( $\alpha=0.05$ )；采用 R 4.3.1 对其进行相关性分析；绘图均在 Origin 2021 和 R 4.3.1 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分植物各器官、凋落物和土壤 C、N、P 质量分数分布特征

由图 1 可知：4 个林分的植物叶、枝、根平均 C 质量分数分别为 516.35、495.05、490.76 g·kg<sup>-1</sup>，平均 N 质量分数为 19.14、6.75、10.46 g·kg<sup>-1</sup>，平均 P 质量分数为 1.61、1.11、0.74 g·kg<sup>-1</sup>。各林分器官间叶的 N、P 质量分数显著高于枝和根 ( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示同一林分不同组分间差异显著 ( $P<0.05$ )；不同大写字母表示同一组分不同林分间差异显著 ( $P<0.05$ )。

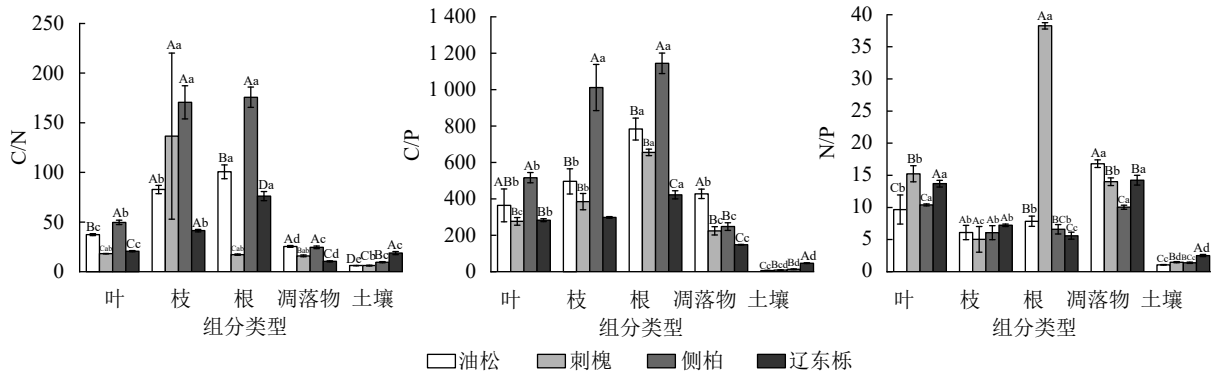
图 1 不同林分植物各器官、凋落物和土壤 C、N、P 质量分数

Figure 1 C, N and P contents of plant organs, litter and soil of different forest stands

不同林分植物各器官-凋落物-土壤 C、N、P 质量分数存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。油松叶、枝、根和凋落物 C 质量分数最高；辽东栎土壤 C 质量分数最高；刺槐叶、根和土壤 N 质量分数最高；辽东栎枝和凋落物 N 质量分数最高；侧柏各组分中的 N 质量分数均显著低于其他树种 ( $P < 0.05$ )；油松叶和土壤 P 质量分数最高，侧柏叶、枝、根 P 质量分数最低。

## 2.2 不同林分植物各器官、凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征

由图 2 可知：4 个林分的植物叶、枝、根平均 C/N 分别为 31.44、107.79、92.40，平均 C/P 为 360.02、547.72、751.41，平均 N/P 为 12.25、6.11、14.58。根的 C/N 和 C/P 显著高于叶和枝 ( $P < 0.05$ )。



不同小写字母表示同一林分不同组分间差异显著 ( $P < 0.05$ )；不同大写字母表示同一组分不同林分间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同林分植物各器官、凋落物和土壤 C、N、P 化学计量比

Figure 2 C, N and P stoichiometric ratios of plant organs, litter and soil of different forest stands

不同林分植物各器官-凋落物-土壤 C/N、C/P、N/P 存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。侧柏叶、枝、根的 C/N 和 C/P 显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ )，枝、根、凋落物的 C/P 在不同林分中表现为辽东栎最低。油松凋落物的 C/N、C/P、N/P 显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ )。辽东栎土壤的 C/N、C/P、N/P 显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ )，油松土壤的 C/N、C/P、N/P 显著低于其他树种 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 典型林分植物各器官、凋落物和土壤 C、N、P 与化学计量特征的相关性分析

如图 3 所示：典型林分植物叶、枝、根的 C、N 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。叶 C 与凋落物 C、土壤 P 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与凋落物 P 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )；叶 N 与凋落物 N、P、土壤 N 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；枝 C 与凋落物 C 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与凋落物 N、P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；枝 N 与凋落物 N、土壤 C 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；枝 P 与凋落物 N、土壤 C、N 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；根 C 与凋落物 C、土壤 P 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与凋落物 P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；根 N 与凋落物 N、土壤 N 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，凋落物 C 与凋落物 P、土壤 N 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与土壤 P 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )；土壤 N 与土壤 P 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

叶 C/N 与凋落物 C/N 呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ )；叶 N/P 与凋落物 C/N 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；根 C/P 与凋落物 C/N 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与土壤 C/P、N/P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；凋落物 C/N、C/P 均与土壤 C/N、C/P 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与 N/P 呈极显著相关 ( $P < 0.001$ )；土壤 C/N 与土壤 C/P、N/P 呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ )；土壤 C/P 与土壤 N/P 呈极显著正相关 ( $P < 0.001$ )。

## 3 讨论

植物 C、N、P 养分分配及环境因子共同决定了植物的生长发育和营养水平<sup>[13]</sup>。本研究中 4 种林分乔木叶片 C、N、P 平均为 516.35、18.64、1.61  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，叶片 C 质量分数较全球植物叶片平均值 (461.6  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 偏高，但是 N、P 质量分数低于全球平均水平 (20.6、2.0  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[1]</sup>。说明该研究区的 C 储备丰富，N、P 较为贫瘠。这与黄土高原土壤结构松散，水土流失严重，植物难以从土壤中吸收 N、P 元素有关<sup>[14]</sup>，亦与中国土壤 P 质量分数普遍较低的规律一致<sup>[15]</sup>。本研究中，油松叶片、枝、根 C 质量分数高于其他植被，表明油松体内积累了更多的有机质，能更好地抵御不良环境的侵扰，这与马钦彦等<sup>[16]</sup>对针叶树种的研究结果一致。相关研究表明：植物 C 质量分数越高，植物对外界不利条件的抵抗能力越



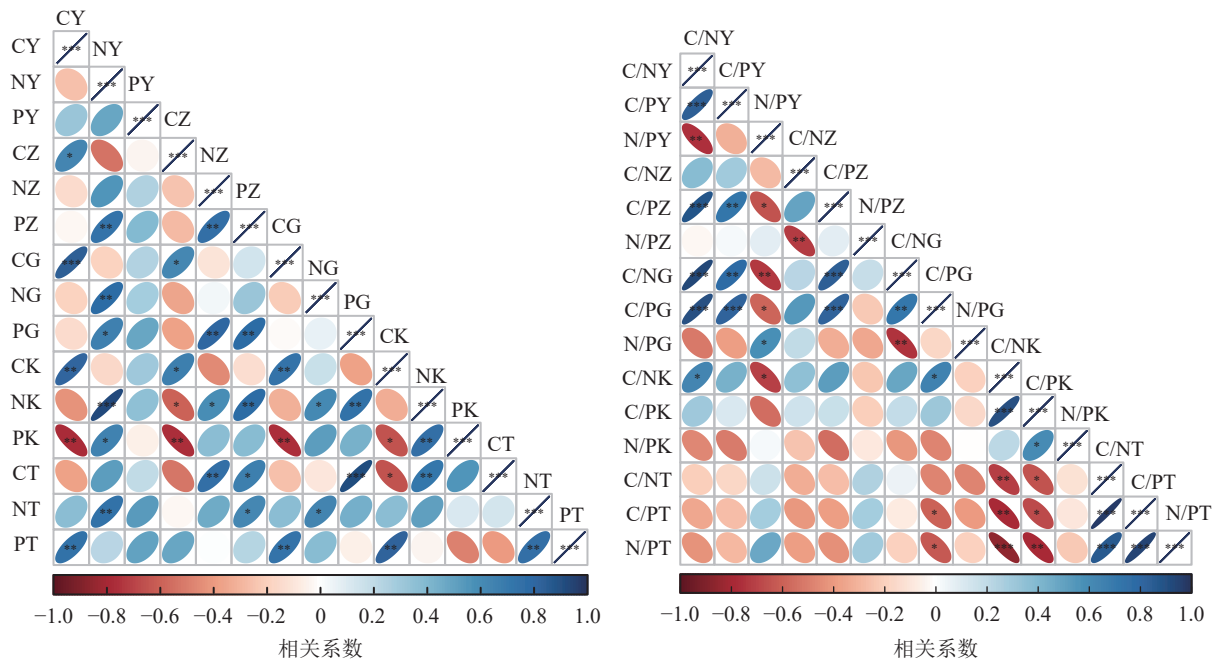


图 3 典型林分植物各器官-凋落物-土壤化学计量特征的相关性关系

Figure 3 Correlations between plant organs, litter and soil stoichiometric characteristics of typical forest stands

强<sup>[17]</sup>。油松作为常绿针叶树种，叶片角质层发达，含有大量木质素与单宁等含碳化合物，具有更强的叶片韧性，可以更好地承受外界物理损伤。刺槐各组分间 N 质量分数显著高于其他植被类型，刺槐作为豆科 Leguminosae 植物，通过根瘤固定空气中的 N，具有较强的固氮能力<sup>[18]</sup>，可以缓解黄土高原普遍缺 N 的现象。

植物叶 C/N、C/P 与植物的固氮能力、养分吸收和利用效率存在正反馈机制，与植物生长速率存在负反馈机制<sup>[19]</sup>。本研究中，刺槐叶 C/N、C/P 最低，表明刺槐在生长过程中生长速率较快。相关研究表明：植物叶 N/P 能够解释植物养分的受限制情况<sup>[20]</sup>。本研究中，油松、侧柏和辽东栎叶的平均 N/P 为 8.34~13.71。胡耀升等<sup>[21]</sup>研究表明：当  $N/P < 14$  时，植物的生长受 N 的限制；当  $14 < N/P < 16$  时，植物的生长同时受 N、P 共同限制。而本研究结果表明：黄土丘陵区油松、侧柏、辽东栎的生长主要受 N 限制，刺槐 N/P 为 15.24，说明刺槐的生长同时受 N 和 P 的限制。凋落物是植物与土壤养分循环之间的纽带<sup>[22]</sup>，其分解速率的快慢和养分释放的多少决定了植物的养分利用效率和土壤养分的供应状况<sup>[23]</sup>。其中，凋落物的 C/N、C/P 能反映其分解速率，C/N、C/P 较低时凋落物更易分解。本研究中，油松凋落物 C/N、C/P 高于其他树种，不易分解，这是因为油松凋落物中较高的 C 和较低的 C/N 抑制了微生物的分解作用<sup>[24]</sup>。有研究发现：凋落物 N/P 也可以表征其分解速率的受限制情况<sup>[25]</sup>。本研究中，黄土丘陵区 4 种林分凋落物 N/P 均低于 25，表明研究区凋落物分解主要受 N 限制。研究区土壤 C/N、C/P 平均值远小于全国平均值<sup>[26]</sup>，这与郭鑫等<sup>[27]</sup>的研究结果一致，表明研究区土壤有机质分解矿化作用较快，不利于土壤有机质积累，且土壤 P 的有效性较高，土壤微生物受 P 的限制作用较小。作为衡量土壤质量的重要参数，土壤 N/P 可以表征土壤养分限制情况，本研究中黄土丘陵区土壤 N/P 远低于中国陆地平均水平<sup>[26]</sup>，表明研究区内植物生长主要受限于土壤 N。

在长期的进化过程中，植物通过调节养分配置，形成相应的元素分配规律，从而产生对应的生长特性，以适应外界环境的变化。本研究中不同器官 C、N、P 质量分数及其计量比存在密切联系，叶与根的 C、N 质量呈显著正相关，说明叶与根养分分配具有协同性，这与王淳等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。不同器官间的 C/N、C/P、N/P 均呈显著正相关，说明不同器官之间相互促进，协同增长；植物资源利用在不同植物器官间是一致的，同时也受相同元素限制。因此，分析植物、凋落物和土壤间 C、N、P 及化学计量特征的相关关系，有助于解释生态系统养分循环的内部调控规律<sup>[29]</sup>。

本研究中典型林分植物各器官 C、N 与凋落物 C、N 呈显著正相关, 叶 C/N 与凋落物 C/N 呈显著正相关, 可见, 植物与凋落物在各元素间存在较强的相关性, 这是因为叶片是凋落物的直接来源, 两者之间存在养分转移。叶和根的 N 与土壤 N 呈显著正相关关系, 表明叶和根与土壤供给的氮之间相互促进。凋落物 C 与土壤 C 呈显著负相关, 凋落物 C/N、C/P 与土壤 C/N、C/P、N/P 间呈显著负相关, 说明凋落物是植物地上部分与土壤之间的介质, 凋落物分解速率的快慢, 影响着凋落物与土壤之间的养分循环关系<sup>[30]</sup>。凋落物分解速率慢, 其自身养分含量高, 返还到土壤中的养分将减少, 因此, 凋落物与土壤元素之间存在负相关关系。

## 4 结论

山西西南部黄土丘陵区典型林分乔木叶、枝、根、凋落物和土壤的生态化学计量特征具有显著差异, 油松林具有较好的固碳能力, 刺槐林具有较好的固氮效果。刺槐生长受 N、P 限制; 油松、侧柏、辽东栎生长受 N 限制; 研究区土壤氮缺乏且凋落物分解受 N 限制。典型林分植物叶、枝、根之间化学计量特征显著正相关, 说明植物各器官养分分配具有协同性, 凋落物与土壤之间化学计量特征显著负相关, 表明凋落物和土壤之间的养分动态变化具有协变性。因此, 从养分限制角度考虑, 建议在晋西北黄土丘陵区人工林管护过程中合理营造刺槐混交林, 增强固氮能力, 并缓解 N 元素的养分限制性。

## 5 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] HAN Wenxuan, FANG Jingyun, REICH P B, *et al.* Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. *Ecology Letters*, 2011, **14**(8): 788 – 796.
- [3] TANG Zhiyao, XU Wenting, ZHOU Guoyi, *et al.* Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(16): 4033 – 4038.
- [4] 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. *植物生态学报*, 2021, **45**(7): 682 – 713.  
TIAN Di, YAN Zhengbing, FANG Jingyun. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45**(7): 682 – 713.
- [5] 武仁杰, 邢玮, 葛之葳, 等. 4种林分凋落叶不同分解阶段化学计量特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(1): 155 – 163.  
WU Renjie, XING wei, GE Zhiwei, *et al.* Stoichiometric characteristics of leaf litter at different decomposition stages in 4 forest types [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(1): 155 – 163.
- [6] 梁楚欣, 范弢, 陈培云. 滇东石漠化坡地不同恢复模式下云南松林土壤碳氮磷化学计量特征及其影响因子[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(3): 511 – 519.  
LIANG Chuxin, FAN Tao, CHEN Peiyun, *et al.* Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil C, N and P in *Pinus yunnanensis* forests under different restoration modes on rocky desertification slope land in eastern Yunnan [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(3): 511 – 519.
- [7] 王浩伊, 满秀玲, 王军, 等. 大兴安岭北部2种不同生活型针叶树种叶片生态化学计量特征研究[J]. *北京林业大学学报*, 2023, **45**(10): 36 – 46.  
WANG Haoyi, MAN Xiuling, WANG Jun, *et al.* Leaf stoichiometry of two conifer species with different life forms in northern Daxing'an Mountains of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, **45**(10): 36 – 46.
- [8] 王兴, 钟泽坤, 王佳懿, 等. 黄土高原撂荒草地土壤碳库对两年增温增雨的响应[J]. *土壤学报*, 2023, **60**(2): 523 – 534.  
WANG Xing, ZHONG Zekun, WANG Jiayi, *et al.* Responses of soil carbon pool of abandoned grassland on the Loess Plateau to two-years warming and increased precipitation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, **60**(2): 523 – 534.
- [9] JING Zhaobin, CHENG Jimin, JIN Jingwei, *et al.* Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 169 – 174.
- [10] 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 Chen, YANG Zhijiao, YANG Lei, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of plants and soil under different vegetation types in the semi-arid loess small watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(5): 1824 – 1834.
- [11] 王洁茹, 石文凯, 达安, 等. 晋北黄土丘陵区油松化学计量特征及其与环境因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2023, **51**(11): 95 – 101, 124.
- WANG Jieru, SHI Wenkai, DA An, *et al.* Stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its relationship with environmental factors in loess hilly region of northern Shanxi Province [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, **51**(11): 95 – 101, 124.
- [12] 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 characteristic in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantations across different densities in the loess hilly region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(6): 160 – 167.
- [13] MINDEN V, KLEYER M. Internal and external regulation of plant organ stoichiometry [J]. *Plant Biology*, 2014, **16**(5): 897 – 907.
- [14] WEN Bojin, DUAN Gaohui, LU Jinxin, *et al.* Response relationship between vegetation structure and runoff-sediment yield in the hilly and gully area of the Loess Plateau, China[J/OL]. *Catena*, 2023, **227**: 107107[2023-11-20]. doi: 10.1016/J.CATENA.2023.107107.
- [15] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. 土壤学报, 2014, **51**(1): 133 – 142.
- YANG Jiajia, ZHANG Xiangru, MA Lusha, *et al.* Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(1): 133 – 142.
- [16] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(5): 96 – 100.
- MA Qinyan, CHEN Xialin, WANG Juan, *et al.* Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(5): 96 – 100.
- [17] 王凯, 齐悦彤, 刘建华, 等. 油松与榆树人工林植物-凋落叶-土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2022, **41**(3): 427 – 434.
- WANG Kai, QI Yuetong, LIU Jianhua, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of plants, leaf litter and soils in *Pinus tabuliformis* and *Ulmus pumila* plantations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(3): 427 – 434.
- [18] BOLAT I, KARA O, SENSOY H, *et al.* Influences of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) afforestation on soil microbial biomass and activity [J]. *Iforest Biogeosciences & Forestry*, 2015, **9**: 171 – 177.
- [19] 冀盼盼, 张健飞, 张玉珍, 等. 不同林龄华北落叶松人工林生态化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, **44**(3): 126 – 132.
- JI Panpan, ZHANG Jianfei, ZHANG Yuzhen, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations at different ages [J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2020, **44**(3): 126 – 132.
- [20] ZHANG Wei, LIU Weichao, XU Miaoping, *et al.* Response of forest growth to C:N:P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 280 – 289.
- [21] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 632 – 638.
- HU Yaosheng, YAO Xuyang, LIU Yanhong. N and P stoichiometric traits of plant and soil in different forest succession stages in Changbai Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(3): 632 – 638.
- [22] 罗丽莹. 不同林龄阔叶树种叶片功能性状与土壤及微生物的协同关系[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- LUO Liying. *Synergistic Relationship of Leaf Functional Traits on Soil and Microorganisms in Different Forest Ages of Phoebe bournei*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.
- [23] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 陕西省3种主要树种叶片、凋落物和土壤N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(2): 443 – 454.
- JIANG Peipei, CAO Yang, CHEN Yunming, *et al.* N and P stoichiometric characteristics of leaves, litter, and soil for three dominant tree species in the Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 443 – 454.
- [24] SAUVADET M, CHAUVAT M, CLUZEAU D, *et al.* The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary

- according to litter quality [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **95**: 262 – 274.
- [25] 余雅尧, 徐雪蕾, 刘超, 等. 宁夏罗山4种典型森林群落植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023-11-20[2023-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20230404.1735.004.html>.  
YU Yayao, XU Xuelei, LIU Chao, *et al.* Differences of ecological stoichiometry of plant-litter-soil in four typical forests on Luo Mountains[J/OL]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023-11-20[2023-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20230404.1735.004.html>.
- [26] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(suppl 1/3): 139 – 151.
- [27] 郭鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2022, **41**(6): 1899 – 1907.  
GUO Xin, WEI Tianxing, CHEN Yuxuan, *et al.* Characteristics of soil ecological stoichiometry in typical fallow-restored vegetation in the loess hilly areas [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **41**(6): 1899 – 1907.
- [28] 王淳, 冀盼盼, 刘璇, 等. 华北落叶松不同器官碳氮磷化学计量特征[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(11): 176 – 181.  
WANG Chun, JI Panpan, LIU Xuan, *et al.* Ecological C, N and P stoichiometry of the needles, twigs and fine roots in pure and mixed stands of *Larix principis-rupprechtii* [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(11): 176 – 181.
- [29] 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3241 – 3252.  
SUN Debin, LI Yunzhao, YU Junbao, *et al.* Spatial distribution and eco-stoichiometric characteristics of soil nutrient elements under different vegetation types in the yellow river delta wetland [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3241 – 3252.
- [30] CHEN Bo, CHEN Lyuyi, JIANG Lan, *et al.* C:N:P stoichiometry of plant, litter and soil along an elevational gradient in subtropical forests of China[J/OL]. *Forests*, 2022, **13**(3): 372[2023-11-20]. doi: 10.3390/F13030372.