

# 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

董从国<sup>1</sup>, 乔雨宁<sup>1</sup>, 曹 扬<sup>1,2</sup>, 陈云明<sup>1,2\*</sup>, 吴 旭<sup>2</sup>, 薛文艳<sup>1</sup>

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

2. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**为阐明油松人工林生态系统化学计量特征空间差异,分析其随气候因素变化的响应机制,以陕北黄土高原森林带、森林草原带和草原带油松人工林为研究对象,分析叶片、凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征及其与气候因子的关系。结果表明:1)油松叶片、凋落物 C 含量以草原带最高,但其土壤 C 含量最低,叶片与土壤 N 含量均表现为森林带>森林草原带>草原带,叶片 P 含量以森林带最高,但其土壤 P 含量最低。2)叶片 C:N 和 C:P 以森林带最低,油松人工林生产力水平随降水梯度的升高而增加;森林草原带叶片 N:P 为 15.57,植被生长受到 N、P 元素共同限制,而森林带和草原带叶片 N:P 均<14,油松生长受到 N 限制;土壤 C:P 表现为森林带>森林草原带>草原带,森林带 P 素释放潜力差。3)油松人工林叶片 C 含量随年均降水量增加而降低,N、P 含量情况则相反;年平均降水、气温与土壤 C、N 含量间存在极显著正相关关系( $P<0.01$ ),而与土壤 P 含量间表现为显著负相关( $P<0.05$ ),气候条件变化对油松人工林生长有着明显的影响。

**关键词:**化学计量学;油松人工林;植被带;叶片-凋落物-土壤连续体

中图分类号:S154.1 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2020)03-0001-08

## Ecological Stoichiometric Characteristics and Its Influential Factors in *Pinus tabulaeformis* Plantation under Different Vegetation Zones in the Loess Plateau

DONG Cong-guo<sup>1</sup>, QIAO Yu-ning<sup>1</sup>, CAO Yang<sup>1,2</sup>, CHEN Yun-ming<sup>1,2\*</sup>, WU Xu<sup>2</sup>, XUE Wen-yan<sup>1</sup>

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

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to elucidate the differences of stoichiometric characteristics in *Pinus tabulaeformis* plantation in spatial scales, and to clarify their response mechanisms to climatic factors, *P. tabulaeformis* plantations occurring in three typical vegetation zones (forest zone, forest-grass zone and grass zone) of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province were taken as the research objects, the stoichiometry of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in leaf, litter, soil and their relationship with climatic factors were analyzed. The results showed that 1) *P. tabulaeformis* plantations in grass zone had the highest C content in leaf and litter, and lowest in soil. The N contents in leaf and soil gradually reduced from forest zone to grass zone. The leaf P content in forest zone was highest while soil P content was lowest. 2) The ratios of C:N and C:P in leaf was lowest in forest zone, indicating that the productivity of *P. tabulaeformis* plantation increased as precipitation increased. The leaf N:P ratio in forest-grass zone was 15.57, indicating that the

收稿日期:2019-08-30 修回日期:2019-10-14

基金项目:国家自然科学基金“抚育间伐调控黄土丘陵区刺槐人工林水分养分机理研究”(41771556);国家重点研发计划课题“黄土丘陵沟壑区植被功能提升与山地果园管理关键技术及示范”(2016YFC0501703);3. 陕西省水保研发项目“秦巴山地坡面近自然水土保持关键技术集成与示范”(2017sbkj-01)。

作者简介:董从国。研究方向:流域管理。E-mail:1223458515@qq.com

\*通信作者:陈云明,研究员,博士生导师。研究方向:植被生态与水土保持。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn

individual growth was limited by N and P. In contrast, the leaf N : P ratios in forest and grass zones were less than 14, indicating that the growth of *P. tabulaeformis* was restricted by N. Soil C : P ranked as forest zone > forest-grass zone > grass zone, indicating that the P release potential was poor in forest zone. 3) The content of C in leaf decreased with the increase of annual precipitation, but the contents of N and P were opposite. Annual average precipitation, annual average temperature were positively correlated with soil C and N content ( $P < 0.01$ ) and negatively correlated with soil P ( $P < 0.05$ ). Climate changes had a significant influence on the growth of *P. tabulaeformis* plantations.

**Key words:** stoichiometry; *Pinus tabulaeformis* plantation; vegetation zone; leaf-litter-soil continuum

土壤作为地球化学元素的主要储存库,是植被生长必须营养元素的主要来源;凋落物分解过程将植物体内 C、N、P 等元素回归土壤,这种养分循环机制使得植被、凋落物与土壤形成一个连续的整体<sup>[1]</sup>。生态化学计量学是综合生物学、化学等基本原理,研究多种化学元素与能量在生态过程中的动态平衡及交互作用影响关系的学科,已成为连接生态学中不同层次和尺度研究的重要工具<sup>[2-3]</sup>,引入生态化学计量学的理论和方法研究“植被-凋落物-土壤”连续体化学计量特征,有助于理解森林生态系统养分循环和平衡调控机制<sup>[4]</sup>。

目前,国内外学者从器官、物种、群落以及生态系统等水平对森林生态系统化学计量特征进行了一系列研究,并结合气候、地形、纬度等因素对生态系统各层次化学计量特征的影响进行讨论<sup>[5-7]</sup>,但多集中在对单一组分或 2 组分间的差异及耦合关系进行分析<sup>[8-10]</sup>。现有的关于“植被-凋落物-土壤”连续体的化学计量学研究多关注不同林龄、树种(或森林类型)间的差异特征<sup>[11-13]</sup>,而针对不同区域环境下森林生态系统化学计量特征的研究较少<sup>[14]</sup>。森林生态系统养分循环和动态平衡受空间范围内气候、地形、物种生理特性等多重因素综合作用的影响,不同区域上的水热条件差异将导致物种生长状况有所差别<sup>[9,15]</sup>,揭示不同气候梯度下“植被-凋落物-土壤”连续体生态化学计量特征及相互关系,对深入了解植物生长制约因素及养分利用策略具有重要意义。

油松(*Pinus tabulaeformis*)作为“退耕还林”工程主要的水土保持树种之一,具有根系发达、抗旱抗寒、耐瘠薄等特点,其人工林广泛分布于黄土高原地区,发挥着重要的生态功能<sup>[16]</sup>。研究发现,受环境因子影响,黄土高原不同区域油松人工林养分利用与生长状况存在较大差异,气候条件变化对植被生长和功能运行影响剧烈<sup>[17]</sup>,针对油松树种化学计量学的研究多是不同林龄或树种间的比较分析<sup>[18-19]</sup>,而关于区域尺度上油松人工林生长养分限制的研究相对薄弱。本研究以黄土高原不同植被带(森林带、森林草原带、草原带)油松人工林为对象,通过测定

油松人工林“叶片-凋落物-土壤”连续体 C、N、P 含量及计量比,结合区域环境要素,分析各组分化学计量特征及其与主要气候因子间的关系,旨在了解不同空间油松人工林养分状况及生长制约因素,为黄土高原植被恢复和油松人工林经营管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样地设置

选择陕西省宜川(森林带)、安塞(森林草原带)和绥德(典型草原带)3 个地域作为研究区,气候类型从温带大陆性半湿润气候向半干旱气候过渡,年平均降水量在 486~568 mm,降水分配不均,多集中于 7~9 月。年日照时长变化范围为 2 395.6~2 615.2 h,年平均气温 8.8℃~9.9℃,各地全年平均昼夜温差较大,土壤类型以黄土性土壤为主。研究区主要优势树种有油松、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等;林下植被主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、披针叶苔草(*Carex lanceolata*)等。

2016 年 6 月,每个研究区分别选择密度相近、面积为 20 m×20 m 的中龄(37~39 a)油松人工林样地 9 个,3 个植被带共设置 27 个样地。坡位为中坡,坡向主要为半阴坡,坡度在 20°~29°,取样前对样地内油松进行每木检尺,记录胸径、树高等信息,根据平均胸径筛选出 3 株生长健康、干形优良的油松作为标准木。研究区及样地基本信息见表 1。

### 1.2 样品采集与处理

2016 年 8 月,在树木生长旺季统一进行采样。利用高枝剪分别在每株标准木冠层南向摘取上、中、下 3 个层次的当年生健康且成熟的叶片约 300 g。每个样地内沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 的小样方,在样方内收集与叶片样品等量的凋落物,混合均匀后装入样本袋带回实验室。利用土钻在收集完凋落物的样方内,各钻取 1 个 0~30 cm 深的土芯得到样地土壤样品。在实验室对凋落物和叶片样品进行杀青后放入 85℃烘箱内烘至恒重并称重,然后将其粉碎;土样经自然风干后研磨成粉状,处理后的全部

样品均过 0.25 mm 筛。分别采用外加热-重铬酸钾氧化法、凯氏定氮法、浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-钼锑抗比色法测定植物和土壤样品中的 C、N、P 含量。

### 1.3 数据分析

数据经过 Excel 2016 整理后,利用 SPSS. 25 软件对不同植被带油松人工林同组分以及相同植被带不同组分间生态化学计量特征的差异性进行单因素

方差分析(One-way ANOVA),其中若方差齐性则采用 LSD 运算下多重比较的结果,若方差不齐性,则选择 Tamhane's T2 法所产生的多重比较结果,显著性水平设置为 P=0.05。采用 Pearson 相关法对各植被带内叶片、凋落物和土壤间 C、N、P 含量以及主要气候因子与各养分含量进行相关性分析,并采用 Origin. 2017 软件做图。

表 1 研究区及样地基本信息

Table 1 Basic information of the study area and sample plots

基本信息	森林带	森林草原带	草原带
地理位置	宜川(YC)	安塞(AS)	绥德(SD)
经纬度	109°38'—110°16'E, 35°24'—36°02'N	108°5'—109°26'E, 36°30'—37°19'N	110°04'—110°41'E, 37°16'—37°45'N
年均降雨量/mm	568	505	486
年均温度/℃	9.9	8.8	9.7
年均太阳辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> )	5 014	4 929	5 527
林龄/a	39	37	38
平均胸径 DBH/cm	16.06	12.21	11.64
树高/m	8.05	7.92	6.38
林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	1 533	1 483	1 317
优势物种	刺槐、油松、辽东栎、铁杆蒿、白羊草	刺槐、柠条、白羊草、黄枚刺	沙棘、铁杆蒿、长芒草、胡枝子

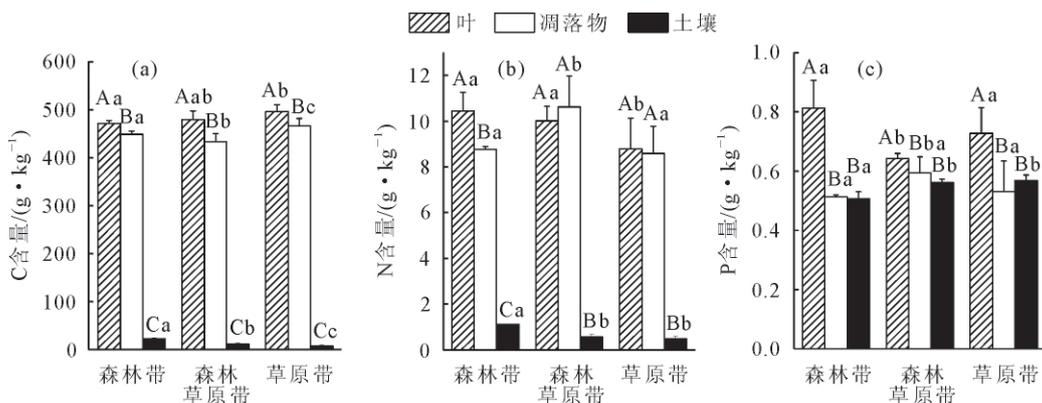
## 2 结果与分析

### 2.1 油松人工林 C、N、P 含量及其变化特征

同植被带内,油松人工林各组分养分含量存在一定差异(图 1)。C 含量在各植被带内均表现为叶片>凋落物>土壤,且差异显著(P<0.05)。N 含量在森林带内表现出与 C 含量相同的变化趋势,且各组分间差异显著,森林草原带凋落物 N 含量略高于叶片,但差异不显著(P<0.05);草原带叶片和凋落物 N 含量差异不显著,但均显著高于土壤(P<0.05)。各植被带内叶片 P 含量均显著高于凋落物和土壤,而凋落物与土壤间并无显著差异(P<0.05)。

同组分 C、N、P 含量随植被带变化表现出不同

的差异性(图 1)。不同植被带油松人工林平均 C 含量在叶片、凋落物、土壤中变化范围分别为 471.54~496.21、433.79~466.81、7.95~22.91 g·kg<sup>-1</sup>。叶片、凋落物 C 含量均以草原带最高,但其土壤 C 含量最低;其中凋落物 C 含量表现为草原带>森林带>森林草原带,而土壤 C 含量表现为森林带>森林草原带>草原带,且差异均显著(P<0.05)。不同植被带平均 N 含量在叶片、凋落物、土壤中变化范围分别为 8.79~10.45、8.59~10.62、0.48~1.11 g·kg<sup>-1</sup>。各组分 N 含量均以草原带最低,其中叶片、土壤 N 含量整体表现为森林带>森林草原带>草原带,且草原带叶片 N 含量显著低于其他植被带,而森林草原带凋落物 N 含量显著高于其他植



注:不同小写字母表示同组分不同植被带间差异显著,不同大写字母表示同植被带不同组分之间差异显著(P<0.05)。下同。

图 1 油松人工林叶片-凋落物-土壤连续体 C、N、P 含量

Fig. 1 The contents of C, N and P in the leaf, litter and soil continuum of *Pinus tabulaeformis* plantation

被带( $P < 0.05$ )。P 含量在各植被带叶片、凋落物、土壤中的变化区间分别为 0.64~0.81、0.51~0.59、0.51~0.56  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。叶片 P 含量表现为森林带>草原带>森林草原带,且森林草原带与其他植被带间差异显著( $P < 0.05$ );凋落物和土壤 P 含量均以森林带最小,其中凋落物 P 含量仅在森林带与森林草原带间差异显著,而森林带土壤 P 含量显著低于其他植被带( $P < 0.05$ )。

## 2.2 油松人工林生态化学计量比变化特征

同植被带内,油松人工林 C、N、P 化学计量比在叶片和凋落物中较为接近,且均显著>土壤( $P <$

0.05)(图 2)。C:N 在森林草原带和草原带内均表现为叶片>凋落物>土壤,除草原带内叶片和凋落物间差异不显著,其余各组间均达到显著性水平;森林带 C:N 以凋落物最高,且各组分两两间差异显著( $P < 0.05$ )。C:P 在森林带和草原带内表现出凋落物>叶片>土壤的趋势,且各组分相互间差异显著;森林草原带各组 C:P 与 C:N 变化趋势一致,且仅叶片与凋落物之间无显著差异( $P < 0.05$ )。N:P 在各植被带内均表现出凋落物>叶片>土壤的趋势,且各组分相互间差异显著( $P < 0.05$ )。

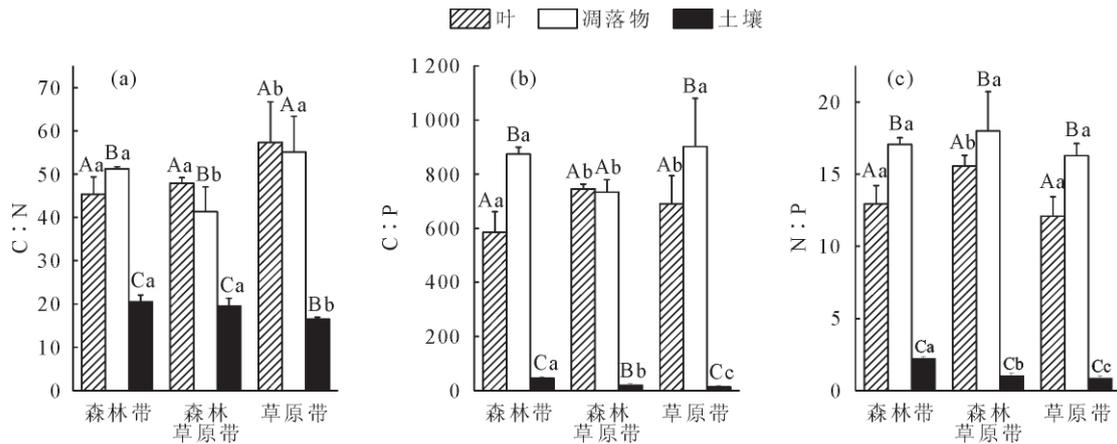


图 2 油松人工林叶片-凋落物-土壤连续体化学计量比

Fig. 2 Stoichiometric ratio in the leaf, litter, and soil continuum of *P. tabulaeformis* plantation

同组分 C、N、P 化学计量比在不同植被带间也存在一定的差异(图 2)。C:N 在叶片、凋落物、土壤中随植被带变化范围分别为 45.34~57.38、41.31~55.13 及 16.58~20.56。叶片和凋落物 C:N 以草原带最高,而土壤 C:N 最大值为森林带,其中叶片、土壤 C:N 仅在森林带和森林草原带间差异不显著,森林草原带凋落物 C:N 显著<其他植被带( $P < 0.05$ )。各植被带 C:P 在叶片、凋落物、土壤中变化范围分别为 585.34~745.66、733.52~902.29、13.92~45.36。叶片 C:P 以森林草原带最高,但与草原带无显著差异;凋落物 C:P 以森林草原带最低,且与其他植被带差异显著( $P < 0.05$ );土壤 C:P 表现为森林带>森林草原带>草原带,且差异均显著( $P < 0.05$ )。各植被带 N:P 在叶片、凋落物、土壤中变化区间分别为 12.10~15.57、16.28~17.99、0.84~2.20。叶片、凋落物 N:P 均表现为森林草原带>森林带>草原带,其中森林草原带叶片 N:P 显著高于其他区域( $P < 0.05$ ),凋落物 N:P 在各区域间差异均不显著;土壤 N:P 以森林带最高,且各植被带间差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。

## 2.3 油松人工林各组分间 C、N、P 含量相关性

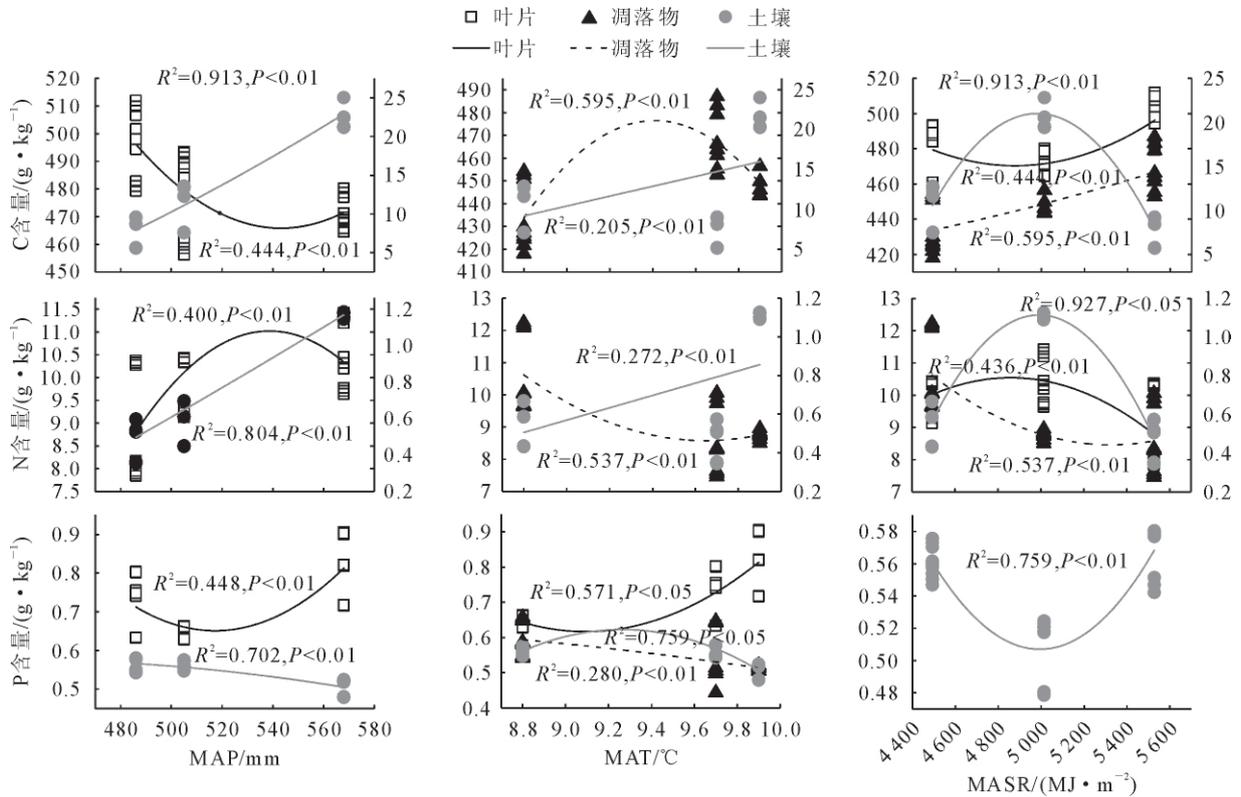
C 含量在森林带内仅凋落物和土壤间表现出极显著的正相关性( $P < 0.01$ ),而在森林草原带和草原带内各组分间均表现出极显著的相关性( $P < 0.01$ ),其中森林草原带叶片与土壤及草原带叶片与凋落物间 C 含量为正相关关系,其余各组分间为负相关关系(表 2)。N 含量在森林带叶片和凋落物间表现为显著负相关( $P < 0.05$ ),而在草原带叶片和凋落物间表现出极显著正相关( $P < 0.01$ ),且在森林草原带叶片和土壤间也表现出极显著的正相关性( $P < 0.01$ )。森林带 P 含量在各组分相互间均存在显著的相关性( $P < 0.05$ ),其中叶片与凋落物、土壤间均表现出负相关,而凋落物与土壤间表现为正相关关系;森林草原带凋落物与土壤以及草原带叶片与土壤组分间 P 含量分别表现出极显著的负相关和正相关关系( $P < 0.01$ )。

## 2.4 油松人工林 C、N、P 含量与气候因子间的关系

年平均降水量(MAP)与凋落物 C、N、P 含量相关性并不显著,而与叶片、土壤各养分含量均具有极显著的相关性( $P < 0.01$ ),其中与土壤 C、N 含量间表现出正相关性且相关系数接近,而与 P 含量则表

现出相反的负相关关系(表 3)。年平均气温(MAT)仅与叶片 C、N 含量间相关性不显著,与其他组分养分含量间相关性均达到显著水平,其中与凋落物 N、P 表现为负相关,而与土壤 C、N 含量之间存在极显著的正相关性( $P < 0.01$ )。年均太阳辐射(MASR)与叶片、凋落物 C、N 含量间均表现出极显著的相关性( $P < 0.01$ ),且与土壤中各养分含量

也存在显著的相关关系,其中与土壤 C 含量表现为极显著负相关( $P < 0.01$ )。基于相关性分析结果,构建“叶片-凋落物-土壤”连续体 C、N、P 含量与主要气候因子间的拟合曲线,发现多项式模型拟合效果较好,且拟合曲线变化趋势符合相关性分析中的结果(图 3)。



注:双纵坐标中,左侧为叶片、凋落物坐标,右侧为土壤坐标。

图 3 油松人工林各组分 C、N、P 含量随气候因子变化特征

Fig. 3 Characteristics of C, N, P contents in *P. tabulaeformis* plantation with climatic factors

表 2 C、N、P 养分含量与叶片、凋落物、土壤间的相关性( $n=27$ )

Table 2 The correlation of C, N and P contents between leaf, litter and soil( $n=27$ )

元素	组分	相关系数		
		森林带	森林草原带	草原带
C	叶片与凋落物	-0.141	-0.957**	0.919**
	叶片与土壤	-0.615	0.938**	-0.892**
	凋落物与土壤	0.827**	-0.927**	-0.975**
N	叶片与凋落物	-0.775*	0.421	0.969**
	叶片与土壤	0.622	0.905**	0.636
	凋落物与土壤	-0.092	0.030	0.443
P	叶片与凋落物	-0.706*	-0.402	0.511
	叶片与土壤	-0.831**	0.148	0.930**
	凋落物与土壤	0.868**	-0.945**	0.194

注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。下同。

表 3 叶片、凋落物、土壤 C、N、P 含量与主要气候因子的关系( $n=81$ )

Table 3 Relationships among leaves, litter, soil C, N and P concentrations and main climatic factors

组分	元素	相关系数		
		MAP	MAT	MASR
叶片	C	-0.583**	0.023	0.600**
	N	0.556**	-0.064	-0.612**
	P	0.555**	0.709*	0.098
凋落物	C	-0.208	0.567**	0.727**
	N	-0.161	-0.710**	-0.491**
	P	-0.258	-0.528**	-0.228
土壤	C	0.955**	0.452**	-0.535**
	N	0.958**	0.521**	-0.474*
	P	-0.866**	-0.482*	0.418*

注: MAT 为年平均降水量, MAT 为年平均气温, MASR 为年平均太阳辐射。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

叶片 C : N、C : P 均以森林带最高,油松人工林生产力表现为森林带>森林草原带>草原带。森林草原带叶片 N : P 为 15.57,植被生长受到 N、P 元素共同限制,而森林带和草原带叶片 N : P 均<14,油松生长受到 N 元素限制。

各植被带凋落物 C : N 均明显>25,表现为草原带>森林草原带>森林带,草原带凋落物分解速率最慢,但养分储存能力强。

研究区土壤 C : N 均高于全球和中国平均水平,土壤有机质分解能力整体较弱。土壤 C : P 表现为森林带>森林草原带>草原带,森林带 P 素释放潜力最差,但森林带油松对 P 元素有着更强的吸收力。

年均降水量与叶片 C 含量呈极显著负相关,N、P 含量情况相反。年均降水、年均气温与叶片 P 含量成正比,而与土壤 P 含量成反比,表明气候因子在空间上的异质性会引起油松人工林养分利用策略的改变。

#### 3.2 讨论

3.2.1 油松人工林 C、N、P 含量及其变化特征 本研究中,油松叶片 C 含量表现为草原带>森林草原带>森林带,表明草原带油松叶片有机质含量较高。主要由于草原带太阳辐射强度及昼夜温差较两区大,白天高温光合作用强,晚上低温抑制呼吸速率,利于有机质的积累<sup>[20]</sup>。不同植被带土壤 C、N 含量沿降水梯度表现为森林带>森林草原带>草原带,这与朱秋莲等<sup>[21]</sup>的研究结论一致。这是因为土壤养分含量取决于凋落物累积量与分解速率,而降水和温度是影响枯落物破碎、分解的主要因素,森林带植被群落生物量高,林下枯落层较厚,高降水量提升了微生物活性,凋落物分解周期短且大气 N 素沉降量更高<sup>[22]</sup>。而森林带土壤 P 含量显著<其他植被带,但其叶片 P 含量最高,表明森林带油松对 P 元素有着更强的富集能力以及更佳的土壤养分亏缺适应性。

3.2.2 油松人工林生态化学计量比变化特征 通常认为叶片 C : N、C : P 与植被生长速率成反比,在一定程度上反映出植被生产力<sup>[23]</sup>。本研究叶片 C : N 为森林带>森林草原带>草原带,且草原带显著<其他植被带,C : P 虽表现为森林带>草原带>森林草原带,但草原带和森林草原带无显著差异,结果反映出研究区油松人工林生产力森林带>森林草原带>草原带的特点,这与前人的研究结果一

致<sup>[24-25]</sup>。这是由于植物生产过程中不仅需要光的参与,更重要的是较多的含 N 叶绿素以及良好的水分条件作基础。N、P 是影响植被生长的主要限制性元素,通常将叶片 N : P 作为评判植被生长受 N、P 养分制约的重要生理指标<sup>[26]</sup>。研究发现,当叶片 N : P<14 时,植物生长受到土壤 N 元素的制约;N : P>16 时,植物生长状况受 P 元素的制约;其比值在两者之间时,则认为植被生长受 N、P 亏缺的共同制约<sup>[27]</sup>。本研究发现不同植被带油松叶片 N : P 以森林草原带最高,达 15.57,说明该植被带油松生长受到 N、P 元素的共同限制;而森林带和草原带 N : P 均<14,两区油松生长受 N 元素限制。

凋落物分解需经过自然淋溶、破碎和微生物代谢 3 个主要过程,其自身养分特征是控制凋落物分解的一个重要方面<sup>[28]</sup>。凋落物 C : N 可以反映出自身的养分归还能力,较低的 C : N 其木质素含量往往较少,使枯落物分解难度降低。当有机体 C : N>25 时,为满足自身生长需求,微生物不仅会利用分解基质中的 N,还会与植物争夺土壤中的可利用 N 源<sup>[29]</sup>,本研究中各植被带凋落物 C : N 远>25,故均不利于凋落物分解,也说明研究区油松容易受 N 亏缺的限制。本研究中,不同植被带凋落物 C : N 表现为草原带>森林带>森林草原带,且森林草原带与其他植被区差异显著,表明森林草原带油松凋落物易分解,但养分储存能力较弱。

土壤 C、N、P 化学计量比是衡量土壤质量的重要参数,可以反映出土壤内部的养分循环状况。本研究中,土壤 C : N 平均值为 18.98,明显高于全球和中国土壤 C : N 的均值(13.3、11)<sup>[30]</sup>,表明油松人工林土壤有机质矿化作用较弱。各植被带土壤 C : N 与土壤有机 C、全 N 含量变化趋势相同,但相比于两者波动更小,变异系数为 10.97%,符合不同生态系统内土壤 C : N 相对稳定的结论,原因在于有机质的形成和消耗都存在相对固定的碳、氮比值<sup>[31]</sup>,本研究中土壤 C、N 含量对气候变化的响应具有一致性(图 3),也说明了土壤 C : N 随气候和环境变化较小。土壤 C : P 是评判土壤中 P 素释放潜力的一种指标,其比值越高 P 的有效性越低<sup>[32]</sup>。各植被带土壤 C : P 呈现出森林带>森林草原带>草原带的趋势,且差异显著,表明草原带油松人工林土壤 P 的有效性最高,释放潜力大,而森林带最小。

3.2.3 油松人工林各组分间 C、N、P 含量及与气候因子的关系 相关性分析显示,各养分含量在油松人工林叶片、凋落物与土壤间具有紧密的联系。C 含量在土壤与叶片、凋落物间相关性系数较高,但前者相关系数整体上略低于后者。这是由于相较于叶

片,凋落物与土壤直接接触,其分解过程是连接土壤与植被进行养分交流的重要环节。N 含量在叶片与土壤间呈现出正相关关系,且在森林草原带达到极显著水平,P 含量在两者间也表现出强烈的相关性,表明土壤是人工林油松叶片矿质营养最主要的供给者,这与宋依璇等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。凋落物与土壤间 N 含量相关性不显著,P 含量在两者间表现为较强的相关性。这与张海鑫等<sup>[34]</sup>的研究结果有所差异,可能是由于不同地区光热条件、养分亏缺状况以及生态系统种间差异等因素所产生的不同植被养分凋解利用机制,具体原因有待于进一步探究。

本研究中,叶片 C 含量随 MAP 增加而减少,N、P 含量则相反,这与赵姗宇等<sup>[5]</sup>对不同降水梯度下樟子松生态化学计量特征研究结果一致,这是由于干旱区油松叶片会构建更多保卫细胞,增加木质素含量和细胞壁韧性以减少水分蒸发,避免植物损伤,而在水分限制缓解的情况下会降低这些含 C 元素较高的组织比重,增加 N、P 比例,蒸腾作用变强,有助于生长发育<sup>[35]</sup>。目前,关于凋落物养分特性对气候因素的响应存在一定争议。例如,谢亚军等<sup>[28]</sup>研究发现我国针叶树种叶凋落物 C、N、P 含量均与 MAP、MAT 存在极显著负相关关系,这与本研究的结果基本一致,而唐仕姍等<sup>[36]</sup>认为凋落叶 P 浓度与 MAP、MAT 呈负相关,但 N 含量则相反,这可能是由于不同植被类型凋落物分解速率综合植被对衰老组织养分重吸收能力的差异所导致<sup>[37]</sup>。本研究显示土壤 C、N 含量与 MAP、MAT 呈极显著正相关,一方面是由于降水增加了土壤中氮素的外源输入;另一方面降水和温度的提升能改善微生物群落结构,增加土壤胞外酶活性,提高其呼吸效率,促进凋落物裂碎、分解,进而增加土壤 C、N 含量。而土壤 P 含量变化与 MAP、MAT 成反比,这与姜沛沛等<sup>[38]</sup>的研究结果一致。这是由于降水的淋洗作用导致土壤层矿质元素向下迁移,降低 P 素的有效性,而土壤 N 素增加会导致微生物对 P 的利用增强<sup>[39]</sup>,同时植被叶片 P 含量与 MAP、MAT 的正相关性说明水热条件改善会加强植被对 P 的吸收,也加速了土壤中 P 的消耗。由于降水会导致光照时长缩减,削弱太阳辐射强度,所以 MASR 与 MAP 之间存在一定的负相关关系,故在本研究中叶片、土壤各养分含量与 MASR 之间的相关性整体呈现出与 MAP 相反的现象。

#### 参考文献:

- [1] AGREN G I, BOSATTA E. Theoretical ecosystem ecology: understanding element cycles[J]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998: 234.
- [2] JAMES E. Biological stoichiometry: a chemical bridge between ecosystem ecology and evolutionary biology[J]. The American Naturalist, 2006, 168(Suppl. 6): 25-35.
- [3] SCHINDLER D W. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[J]. Nature, 2003, 423(6937): 225-226.
- [4] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.  
HE J S, HAN X G. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6. (in Chinese)
- [5] 赵姗宇, 黎锦涛, 孙学凯, 等. 樟子松人工林原产地与不同自然降水梯度引种地土壤和植物叶片生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7189-7197.
- [6] REICH P B, OLEKSYN J, TILMAN G D. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [7] SOETHE N, LEHMANN J, ENGELS C. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador[J]. Journal of Tropical Ecology, 2008, 24(4): 397-406.
- [8] 张秋芳, 谢锦升, 陈奶寿, 等. 生态恢复对马尾松叶片化学计量及氮磷转移的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 267-276.
- [9] YUAN Z Y, CHEN H Y H, REICH P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus[J]. Nature Communications, 2011, 2: 344.
- [10] YU Q, CHEN Q S, ELSER J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability[J]. New Phytologist, 2012, 194(4): 944-952.
- [11] LU Y H, CAO Y, XU L M, et al. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in desertification area of Poyang lake[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 329-335.
- [12] YANG Y, LIU B R, AN S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of northern China[J]. Catena, 2018, 166: 328-338.
- [13] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.  
JIANG P P, CAO Y, CHEN Y M, et al. Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6188-6197. (in Chinese)
- [14] ZHANG G Q, ZHANG P, PENG S Z, et al. The coupling of leaf, litter, and soil nutrients in warm temperate forests in northwestern China[J]. Scientific, 2017, 7(1): 11754.
- [15] CREGGER M A, MCDOWELL N G, PANGLE R E, et al. The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem[J]. Functional Ecology, 2014, 28(6): 1534-1544.
- [16] 霍晓英, 彭守璋, 任婧宇, 等. 陕西省油松林生产力动态及对未来气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 412-420.  
HUO X Y, PENG S Z, REN J Y, et al. Dynamic change of *Pinus tabulaeformis* forest productivity and its response to future

- climate change in Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 412-420. (in Chinese)
- [17] 焦醒, 刘广全. 陕西黄土高原油松生长状况及其影响因子分析[J]. 西北植物学报, 2009, 29(5): 867-873.
- [18] 汪宗飞, 郑粉莉. 黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6870-6880.  
WANG Z F, ZHENG F L. C, N, and P stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Ziwuling region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6870-6880. (in Chinese)
- [19] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1328-1336.  
ZHANG G Q, ZHANG P, CHEN Y M, *et al.* Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1328-1336. (in Chinese)
- [20] 游桂莹, 张志渊, 张仁铎. 全球陆地生态系统光合作用与呼吸作用的温度敏感性[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8392-8399.
- [21] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [22] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3300-3310.  
WANG X Y, ZHAO X Y, LI Y L, *et al.* Effects of environmental factors on litter decomposition in arid and semi-arid regions: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3300-3310. (in Chinese)
- [23] 白雪娟, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同人工林叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3823-3830.  
BAI X J, ZENG Q C, AN S S, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil in different plantations on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3823-3830. (in Chinese)
- [24] 李军, 王学春, 邵明安, 等. 黄土高原 3 个不同降水量地点油松林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟[J]. 林业科学, 2010, 46(11): 25-35.
- [25] 曹旭平, 王梅, 周建云, 等. 陕北黄土高原油松人工林林分结构及个体生长[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 155-159.  
CAO X P, WANG M, ZHOU J Y, *et al.* Individual growth and stand structure of *Pinus tabulaeformis* plantation in Loess Plateau of northern Shaanxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 155-159. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- [28] 谢亚军, 梁越, 肖红伟, 等. 中国陆地生态系统叶凋落物分解的格局及控制因素[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2018, 41(3): 271-276.
- XIE Y J, LIANG Y, XIAO H W. Pattern and controlling factors of terrestrial leaf litters decomposition in China[J]. Journal of East China University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 41(3): 271-276. (in Chinese)
- [29] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 1-379.
- [30] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.  
ZENG Q C, LI X, DONG Y H, *et al.* Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau: the influence of different vegetation zones[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1881-1891. (in Chinese)
- [31] 姜路喜, 杨安定, 岳亚军, 等. 生态化学计量特征对松栎混交林生产力的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 31-37.  
JIANG L X, YANG A D, YUE Y J, *et al.* Effects of community stoichiometric characteristics on the productivity of a Pine-Oak mixed forest in the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 31-37. (in Chinese)
- [32] 苏波, 韩兴国, 黄建辉, 等. 植物的养分利用效率(NUE)及植物对养分胁迫环境的适应策略[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 335-343.
- [33] 宋依璇, 邓继峰, 李景浩, 等. 辽西北典型人工林地不同坡位土壤养分特征及与林木生长性状的关系[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 18-24.  
DENG Y X, DENG J F, LI J H, *et al.* Soil chemical properties and their relations with stand growth of typical afforestation tree species in northwest Liaoning Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3): 18-24. (in Chinese)
- [34] 张海鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原子午岭林区主要林分生态化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 1043-1052.
- [35] 李全发, 王宝娟, 安丽华, 等. 青藏高原草地植物叶解剖特征[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2062-2070.
- [36] 唐仕姗, 杨万勤, 王海鹏, 等. 中国森林凋落叶氮、磷化学计量特征及控制因素[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(2): 316-322.
- [37] 宁秋蕊, 李守中, 姜良超, 等. 植物叶片养分再吸收特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 811-817.
- [38] 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 P P, CAO Y, CHEN Y M, *et al.* N and P stoichiometric characteristics of leaves, litter, and soil for three dominant tree species in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 443-454. (in Chinese)
- [39] 许森平, 任成杰, 张伟, 等. 土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2445-2457.  
XU M P, REN C J, ZHANG W, *et al.* Responses mechanism of C:N:P stoichiometry of soil microbial biomass and soil enzymes to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2445-2457. (in Chinese)