

陈晶亮,谭松伟,刘超,等.宁夏罗山典型林分土壤养分特征与凋落物质量的关系[J].中国沙漠,2025,45(3):326-336.

宁夏罗山典型林分土壤养分特征与凋落物质量的关系

陈晶亮^{1,2},谭松伟³,刘超³,黄磊⁴

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.宁夏罗山国家级自然保护区管理局,宁夏 吴忠 751999; 4.宁夏大学 林业与草业学院,宁夏 银川 750021)

摘要:凋落物层和土壤层是森林生态系统物质循环和能量流动的重要载体,量化森林土壤养分特征及其与凋落物质量和养分利用效率的关系,是揭示干旱山地森林生态系统养分循环和评估生产力的关键。本研究以宁夏罗山国家级自然保护区内青海云杉纯林、油松纯林和青海云杉-油松混交林为对象,基于样地调查和土壤、凋落物样品测定,运用冗余分析(RDA)阐释了3种典型林分土壤养分特征及其与凋落物质量和养分利用效率的关系。结果表明:(1)3种典型林分土壤养分含量在0~10 cm土层均显著高于10~20 cm和20~40 cm土层($P<0.05$),而在10~20 cm和20~40 cm土层之间差异均不显著($P>0.05$);(2)3种林分类型凋落物各分解层养分含量依次为TC>TN>TK>TP,且青海云杉-油松混交林的全磷含量和凋落物储量均显著高于纯林($P<0.05$);(3)纯林各分解层C/N、C/P、N/P均大于青海云杉-油松混交林,未分解层C/N和C/P值显著大于($P<0.05$)半分解层,N/P值均小于14,纯林的P养分利用效率显著大于青海云杉-油松混交林($P<0.05$);(4)3种林分类型凋落物养分归还量在各分解层均表现为C>N>P归还量,且青海云杉-油松混交林高于纯林;(5)RDA表明,0~10 cm土层凋落物的未分解层磷含量(UP)、磷养分利用效率(UPNUE)、氮磷比(UN/P)、碳磷比(UC/P)和半分解层磷养分利用效率(SPNUE)、碳氮比(SC/N)对土壤养分含量变化作用明显,土壤养分含量与UP呈显著正相关($P<0.05$),而与UPNUE呈显著负相关($P<0.05$)。青海云杉-油松混交林比纯林在土壤养分积累以满足植物生长的养分需求方面更具优势,且N为3种林分的主要限制性元素,在N限制范围内纯林较青海云杉-油松混交林更易受磷元素含量的影响。

关键词:森林凋落物;土壤养分;凋落物质量;养分归还;养分利用效率

文章编号:1000-694X(2025)03-326-11

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00124

中图分类号:S15

文献标志码:A

0 引言

凋落物层是森林生态系统重要的功能层,不仅在涵养水源和防止水土流失方面发挥关键作用,还能促进土壤有机质形成并维持其稳定。土壤中约80%的可溶性有机碳和可溶性有机氮来自于森林凋落物,全球凋落叶碳年平均释放速率为0.69,凋落物养分释放是连接陆地和大气碳循环的关键生态过程^[1],也是森林生态系统物质循环与能量流动的重要环节^[2-4]。森林植被约85%的光合作用产物通过凋落物的形式分解释放到土壤,全球每年产生的

植物凋落物约为 3.758×10^9 Mg,是土壤养分的重要来源^[5]。森林凋落物来自于植物,且与土壤密切接触,是连接地上植物和地下生态系统的纽带^[6],深刻影响着森林生态系统的一系列生态、水文过程和生物地球化学循环,如土壤有机质的形成和养分循环、植物生长等^[7],增加土壤肥力,改变土壤生物多样性和群落结构,提高森林生产力,调节植被和土壤的正反馈,为维持森林生态系统平衡与稳定发挥重要作用^[7-8]。近年来,频发的全球极端天气和气候事件导致森林出现大面积干枯和死亡,严重影响森林凋落物的数量、质量,进而可能迫使土壤从

收稿日期:2025-03-30; 改回日期:2025-05-27

资助项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BEG02039);宁夏自然科学基金项目(2024AAC02027);宁夏留学人员回国创新项目

作者简介:陈晶亮(1999—),男,甘肃陇西人,硕士研究生,主要从事森林生态水文学研究。E-mail: chenjingliang22@mails.ucas.ac.cn

通信作者:黄磊(E-mail: mathecology@163.com)

“汇”向“源”转变,严重损害森林生态系统服务功能^[9-11]。因此,揭示土壤养分特征及其与凋落物质量的关系是量化森林生态系统养分平衡和土壤肥力的关键^[12]。

森林凋落物层主要分为未分解层和半分解层,包括枝叶、花果和树皮残体等,是森林生态系统重要的功能层和土壤养分的主要来源,调控土壤养分的动态平衡^[13]。凋落物营养元素含量在其分解过程中不断变化,当外界环境条件一致时,木质素、纤维素、C、N、P、K含量和C/N、C/P、N/P等均可以表征凋落物质量,这些对凋落物的分解和养分的限制及归还有重要作用^[12],也是维持林木生长和土壤碳库的重要载体^[14],进而影响植物对养分的吸收与利用效率。张楠等^[14]将凋落物储量和养分归还量的比值作为凋落物的养分利用效率,比值越小,说明供植物生长的养分较为充足,限制作用越弱,比值越大则相反^[15]。因此,量化养分利用效率对理解森林生态系统养分有效性和长期生产力至关重要^[16]。

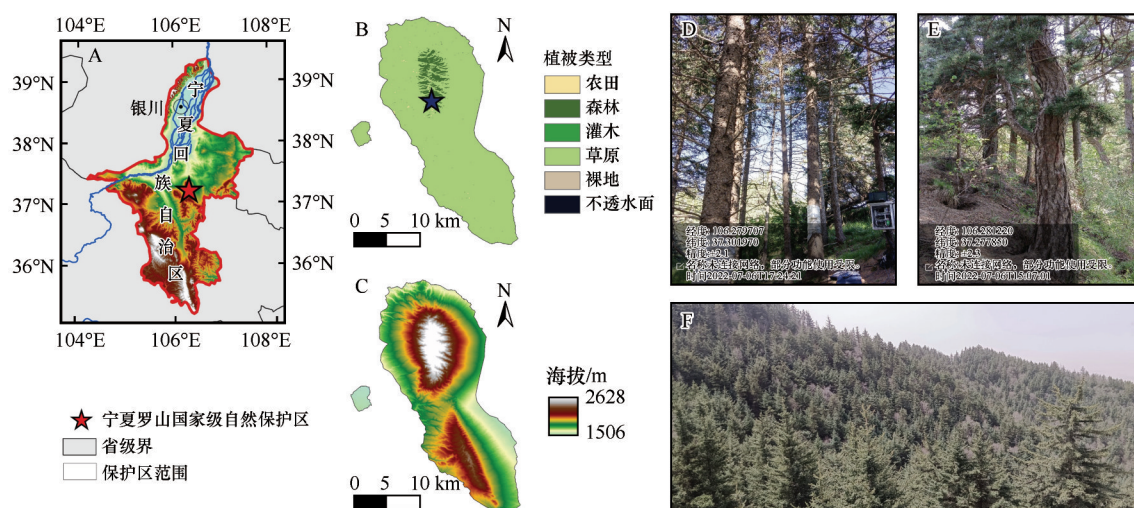
宁夏罗山国家级自然保护区地处鄂尔多斯高原西部与黄土高原北部的干旱半干旱地带,为宁夏三大天然次生林区之一,是宁夏中部干旱带重要的绿色生态屏障和水源涵养区,在宁夏社会、经济发展和生态安全方面的地位举足轻重^[17]。开展宁夏罗山典型林分土壤养分特征及其与凋落物质量和养分利用效率关系对量化其森林生态系统养分循环和评估其生态系统功能具有重要意义。已有研究揭示了该区典型森林凋落物层水文效应以及群

落植物-凋落物-土壤生态化学计量特征^[3,18],但缺乏对该类型土壤养分特征、凋落物层质量特征以及二者之间关系的系统研究。本文以宁夏罗山3种典型林分(青海云杉纯林、油松纯林、青海云杉-油松混交林)为研究对象,通过样地调查和样品测定,运用冗余分析(RDA)揭示3种典型林分土壤养分特征及其与凋落物质量和养分利用效率的关系,为该区生态系统养分循环和森林经营管理等提供基础数据和科学依据^[6,19]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样地设置

宁夏罗山国家级自然保护区南北长36 km,东西宽18 km,海拔1 560—2 624.5 m,总面积33 710 hm²(图1)。地处宁夏中部干旱区,位于典型草原与荒漠生态过渡带,属于中温带干旱大陆性气候,年平均日照时数为2 881.5 h,气温年、日较差大,降水少而集中,多年平均262.5 mm,年平均相对湿度为49%。植被类型以森林、灌丛、草甸和草原为主,其中森林类型主要为青海云杉(*Picea crassifolia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)等,林下植被有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、榆树(*Ulmus pumila*)、藜(*Chenopodium album*)、升麻(*Actaea cimicifuga*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、蒙古扁桃(*Prunus mongolica*)、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)、沙枣



注:A:宁夏罗山国家级自然保护区在宁夏回族自治区的位置;B:宁夏罗山国家级自然保护区植被垂直分布;

C:宁夏罗山国家级自然保护区海拔;D:青海云杉纯林;E:油松纯林;F:青海云杉-油松混交林

图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

(*Elaeagnus angustifolia*)等,土壤主要为灰褐土和灰钙土^[20]。

2022年7月,在宁夏罗山国家级自然保护区分别选取坡形、坡度、坡向等地形因子基本一致的青海云杉纯林(QY)、油松纯林(YS)和青海云杉-油松混交林(QY+YS)。在每种林分内设置具有代表性的样地3个(表1),每个样地面积为20 m×20 m,调查林分类型、林冠郁闭度和树木生长等基本指标,并记录坡向、海拔等立地特征,同时采集土壤和凋落物样品。

表1 3种林分类型样地概况

Table 1 Basic overview of plots of three forest types

特征	林分类型		
	青海云杉 纯林QY	油松纯林 YS	青海云杉-油松混 交林QY+YS
经度/(E)	106°28′	106°28′	106°28′
纬度/(N)	37°30′	37°28′	37°28′
海拔/m	2 531.5	2 331.5	2 378.3
土壤类型	灰褐土	灰褐土	灰褐土
坡向	阴	阴	阴
坡度/(°)	30.4	26.5	20.6
土壤pH	8.27±0.07 ^b	8.56±0.15 ^a	8.29±0.38 ^b
密度	2 000.00±	2 800.00±	1 500.00±
/(株·hm ⁻²)	458.26 ^b	511.24 ^a	362.37 ^b
树高/m	13.61±3.27 ^b	10.40±2.81 ^b	16.63±4.73 ^a
枝下高/m	4.46±1.26 ^b	1.86±0.43 ^c	6.49±1.57 ^a
胸径/cm	21.68±3.51 ^a	24.17±8.80 ^a	22.25±7.11 ^a
郁闭度	0.63±0.05 ^a	0.65±0.15 ^a	0.65±0.15 ^a

注:不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

1.2 凋落物样品采集与指标测定

在各林分样地内随机选取3个30 cm×30 cm的小样方,每个样方内的凋落物按未分解层(凋落物保持原始质地和原始形状)和半分解层(凋落物颜色变黑,仅部分保持原始状态)分层收集,现场测定各层凋落物的厚度和鲜重,单独装袋带回实验室,于85℃烘干至恒重,使用植物粉碎机将烘干样品磨碎,过60目筛孔保存,用于测定凋落物全碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)。

凋落物TC采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;凋落物TN采用硫酸消解-凯氏定氮法测定;凋落物TP采用钼锑抗吸光光度法测定;凋落物TK采用原

子吸收分光光度法测定^[21]。

1.3 土壤样品采集及测定

在每块标准样地按照未分解层和半分解层采集凋落物后,在相同位置用土钻对林下植被土壤进行取样,按照0~10、10~20、20~40 cm分层采集,每个样方3次重复且混合各层土壤样品,拣出砾石、根系和动物残体等。将混合土样分成两份,一份4℃低温保存供测定速效氮(SAN)、速效钾(SAK)和速效磷(SAP),另一份带回实验室自然风干、磨碎后过2 mm筛,测定土壤有机质(SOM)、TN、TP和TC。

SOM和TC采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;TN采用硫酸消解-凯氏定氮法测定;TP采用NaOH碱熔-钼锑抗分光光度法测定;SAN采用碱解扩散法测定;SAK通过乙酸铵溶液浸提,采用火焰光度法测定;SAP通过碳酸氢钠/氟化钠盐酸浸提,采用钼锑抗比色法测定^[21]。

1.4 数据计算与处理

$$R_e = C_e \times V \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$NUE = V/R_e \quad (2)$$

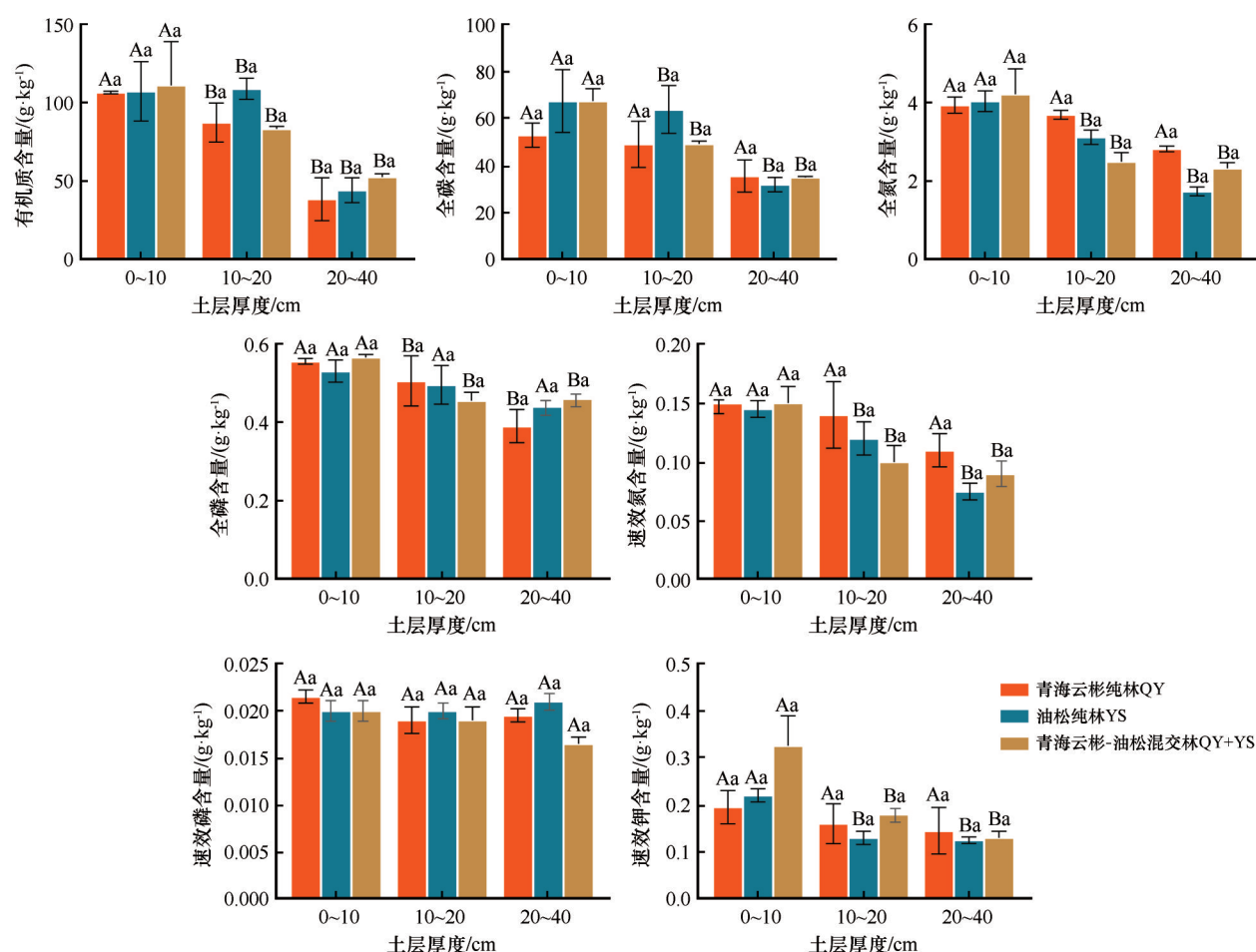
式中: R_e 代表凋落物养分归还量($t \cdot hm^{-2}$); C_e 代表凋落物各组分养分含量($g \cdot kg^{-1}$); V 代表凋落物储量($t \cdot hm^{-2}$); 10^{-3} 为单位换算系数; NUE 越大,表明林内具有越高的养分经济,从而使森林将受到更高的养分制约^[14-15]。

在SPSS 26.0中使用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和Duncan's multiple range tests法对3种林分类型土壤养分特征及其凋落物质量进行差异显著性检验($P<0.05$),使用t检验分析3种林分类型未分解层和半分解层凋落物质量之间的差异($\alpha=0.05$);使用Canoco 5.0软件进行冗余分析(RDA),揭示土壤养分特征与凋落物质量和养分利用效率之间的关系。绘图在GraphPad Prism 9(GraphPad Software Inc., San Diego, 美国)中进行。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤养分含量特征

宁夏罗山国家级自然保护区同一林分类型不同土层之间土壤养分含量差异显著($P<0.05$,图2)。其中,青海云杉纯林土壤有机质含量和磷含量在0~



注:不同大写字母表示相同林分类型不同土层间的差异显著,不同小写字母表示相同土层不同林分类型间的差异显著($P<0.05$)

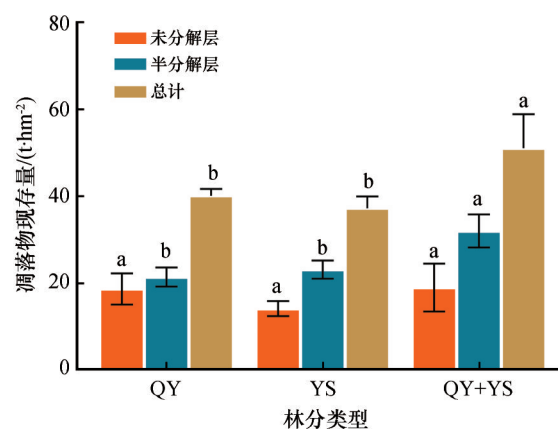
图2 3种林分类型(青海云杉纯林QY,油松纯林YS,青海云杉-油松混交林QY+YS)土壤养分含量特征

Fig.2 Characteristics of soil nutrient content of three forest types

10 cm 土层显著高于 10~20 cm 和 20~40 cm 土层($P<0.05$);油松纯林 0~10 cm 土层有机质含量、碳含量、氮含量和速效氮含量显著高于 10~20 cm 和 20~40 cm 土层($P<0.05$);青海云杉-油松混交林土壤有机质含量、碳含量、氮含量、磷含量、速效氮含量和速效钾含量在 0~10 cm 土层均显著高于 10~20 cm 和 20~40 cm 土层($P<0.05$)。3 种典型林分土壤养分含量在 0~10 cm 土层中均显著高于 10~20 cm 和 20~40 cm 土层,随土层深度的增加而显著降低($P<0.05$),而 3 种典型林分土壤养分含量在 10~20 cm 和 20~40 cm 土层之间均不显著($P>0.05$),因此,后文对 0~10 cm 土层进行相关的分析。

2.2 不同林分类型凋落物储量和质量特征

3 种林分类型凋落物总储量为 37.33~51.08 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,且青海云杉-油松混交林显著大于青海云杉和油松纯林(图 3, $P<0.05$)。其中,半分解层凋落物储量为



注:不同小写字母表示相同分解层不同林分类型间的差异显著($P<0.05$)

图3 3种林分类型(青海云杉纯林QY,油松纯林YS,青海云杉-油松混交林QY+YS)凋落物储量特征

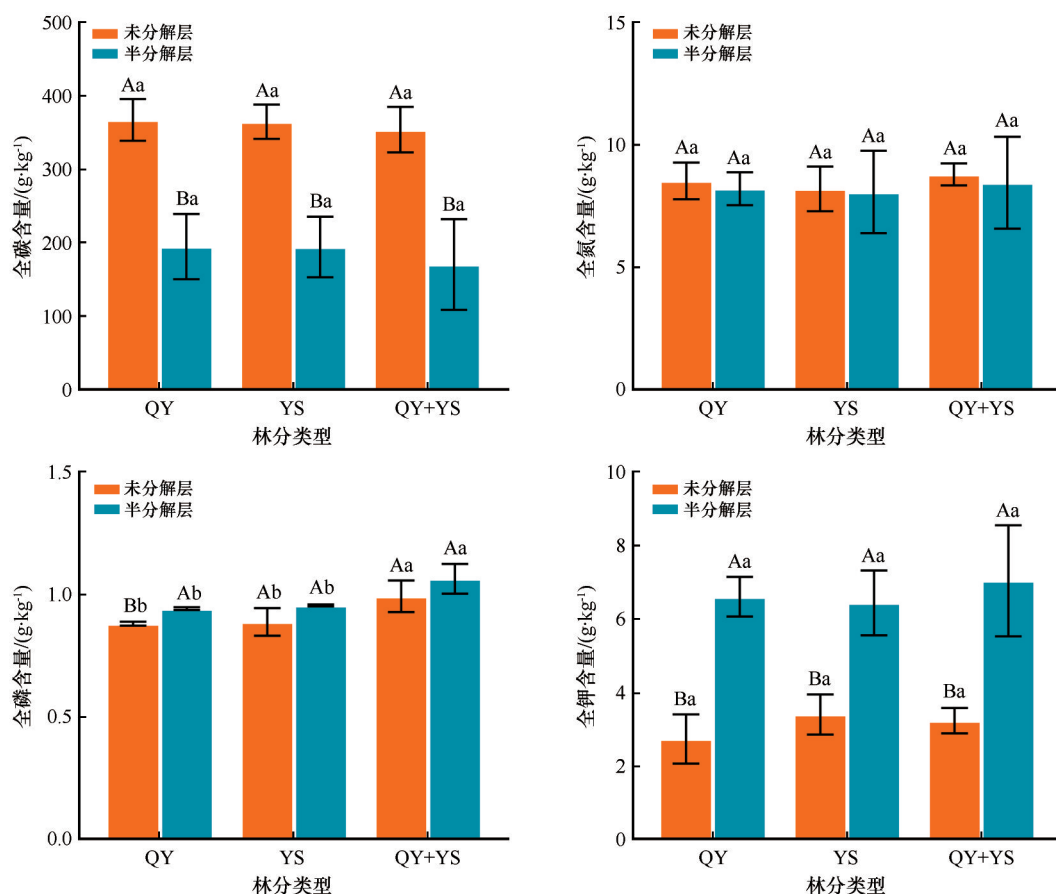
Fig.3 Characteristics of litter stocks of three forest types

21.46~32.05 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占总储量的 53.4%~62.7%,青海云杉-油松混交林显著大于纯林($P<0.05$);未分解

层凋落物储量为 $14.17\sim 19.03\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占总储量的 $37.3\%\sim 46.6\%$ 。从3种林分类型凋落物储量及占比的分层变化看, 3种林分类型的半分解层均高于未分解层。

3种林分类型凋落物各分解层养分含量大小依次为 $\text{TC}>\text{TN}>\text{TK}>\text{TP}$ 。青海云杉-油松混交林 TP 含量在未分解层和半分解层中均显著高于青海云杉和油松纯林(图4, $P<0.05$), 分别高于 12.5% 、 11.2% 和 13.8% 、 11.5% ; 凋落物未分解层 TC 含量为 $354.10\sim 367.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TN 含量为 $8.20\sim 8.80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TK 含量

为 $2.76\sim 3.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 凋落物半分解层 TC 含量为 $170.63\sim 194.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TN 含量为 $8.07\sim 8.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TK 含量为 $6.45\sim 7.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。3种林分类型不同分解层凋落物 TC 含量未分解层显著大于半分解层 ($P<0.05$), 即凋落物 C 元素含量随着分解程度增加而降低。TK 与 TC 元素含量相反, 即半分解层显著大于未分解层 ($P<0.05$), 凋落物 TK 含量随着分解程度增加而增加, 逐渐积累; 凋落物 TN 含量未分解层大于半分解层, 而 TP 含量变化规律与氮元素含量相反, 即未分解层小于半分解层。



注: 不同大写字母表示相同林分类型不同分解层间的差异显著, 不同小写字母表示相同分解层不同林分类型间的差异显著 ($P<0.05$)

图4 3种林分类型(青海云杉纯林QY, 油松纯林YS, 青海云杉-油松混交林QY+YS)凋落物养分含量特征

Fig.4 Nutrient content characteristics of litter of three forest types

3种林分类型不同分解层凋落物 C/N、C/P、N/P 及养分含量、归还量和养分利用效率等指标都能反映森林凋落物的质量(表2)。青海云杉和油松纯林的 C/N、C/P、N/P 值分别为 $23.53\sim 43.09$ 、 $206.52\sim 415.92$ 、 $8.70\sim 9.66$ 和 $24.13\sim 44.99$ 、 $203.14\sim 412.10$ 、 $8.44\sim 9.20$, 青海云杉-油松混交林的 C/N、C/P、N/P 值分别为 $19.83\sim 40.23$ 、 $158.41\sim 356.67$ 、 $7.90\sim 8.86$, 其中 N/P 值为 $7.90\sim 9.66$, 均小于 14。青海云杉纯林和

油松纯林各分解层 C/N、C/P、N/P 均大于青海云杉-油松混交林。3种林分类型不同分解层凋落物 C/N 和 C/P 值均表现为未分解层显著大于半分解层 ($P<0.05$), 其中青海云杉纯林分别下降了 45.4% 和 50.3% , 油松纯林分别下降了 46.4% 和 50.7% , 青海云杉油松混交林分别下降了 50.7% 和 55.6% , N/P 值在未分解层和半分解层中差异不显著 ($P>0.05$)。

如图5所示, 凋落物 C 归还量为 $4.12\sim 6.87\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,

表 2 3 种林分类型(青海云杉纯林 QY, 油松纯林 YS, 青海云杉-油松混交林 QY+YS)不同分解层凋落物 C/N、C/P 和 N/P

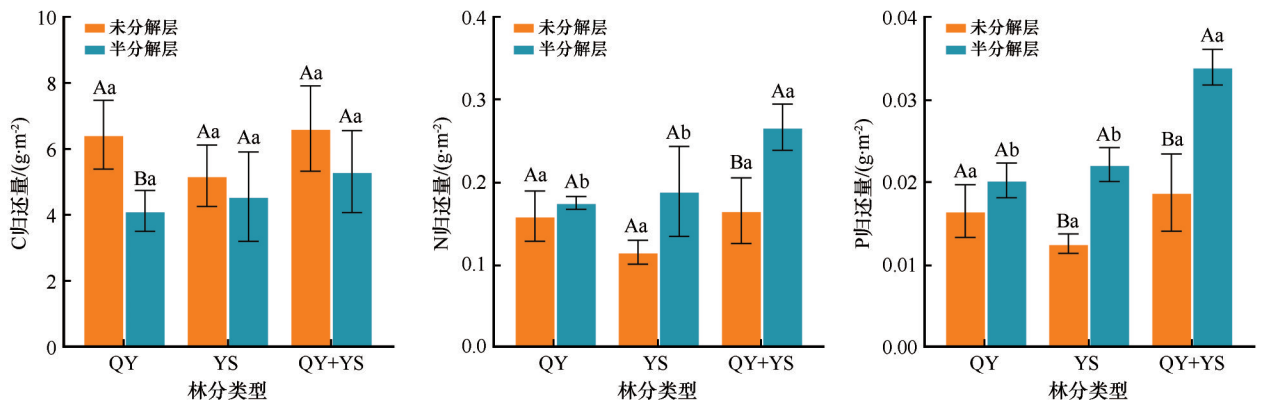
Table 2 C/N, C/P, and N/P litter of different decomposition layers of the three forest types				
层次	林分类型	C/N	C/P	N/P
未分解层	QY	43.09±0.66 ^{Aa}	415.92±28.29 ^{Aa}	9.66±0.76 ^{Aa}
	YS	44.99±7.15 ^{Aa}	412.10±51.00 ^{Aa}	9.20±0.47 ^{Aa}
	QY+YS	40.23±2.23 ^{Aa}	356.67±29.39 ^{Aa}	8.86±0.26 ^{Aa}
半分解层	QY	23.53±3.52 ^{Ba}	206.52±46.66 ^{Ba}	8.70±0.70 ^{Aa}
	YS	24.13±1.63 ^{Ba}	203.14±42.56 ^{Ba}	8.44±1.75 ^{Aa}
	QY+YS	19.83±3.15 ^{Ba}	158.41±47.87 ^{Ba}	7.90±1.31 ^{Aa}

注：不同大写字母表示相同林分类型不同分解层间的差异显著, $P<0.05$; 不同小写字母表示相同分解层不同林分类型间的差异显著, $P<0.05$ 。

N 归还量为 0.12~0.27 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, P 归还量为 0.01~0.03 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 3 种林分类型各分解层凋落物养分归还量均表现为 C 归还量>N 归还量>P 归还量, 且各分解层凋落物养分归还量青海云杉-油松混交林高于纯林。其中, 在半分解层中, 青海云杉-油松混交林的

N、P 归还量显著大于油松纯林和青海云杉纯林 ($P<0.05$), 分别高出 42.1%、50.0% 和 50.0%、49.9%。同时, 青海云杉-油松混交林的半分解层凋落物 N、P 归还量也显著大于未分解层 ($P<0.05$), 分别高出 58.8% 和 49.9%; 青海云杉纯林未分解层 C 归还量显著大于半分解层 ($P<0.05$), 高出 56.1%; 油松纯林半分解层 P 归还量显著大于未分解层 ($P<0.05$), 高出 100.0%。

纯林的 N 养分利用效率在各分解层中大于青海云杉-油松混交林, 其中在未分解层中, 油松纯林和青海云杉纯林比青海云杉-油松混交林高 7.9% 和 3.5% (图 6); 半分解层中, 油松纯林和青海云杉纯林比青海云杉-油松混交林高 5.1% 和 0.4%。而凋落物 P 养分利用效率在各分解层中均为青海云杉纯林和油松纯林显著大于青海云杉-油松混交林 ($P<0.05$), 在未分解层中青海云杉纯林和油松纯林分别高于青海云杉-油松混交林 12.3% 和 11.7%; 在半分解层中分别高 12.6% 和 11.1%。在同一林分类型不同分解层中, 青海云杉纯林 P 养分利用效率未分解层显著大于半分解层 ($P<0.05$), 高 6.7%, 其余均不显著 ($P>0.05$)。



注：不同大写字母表示相同林分类型不同分解层间的差异显著, 不同小写字母表示相同分解层不同林分类型间的差异显著 ($P<0.05$)

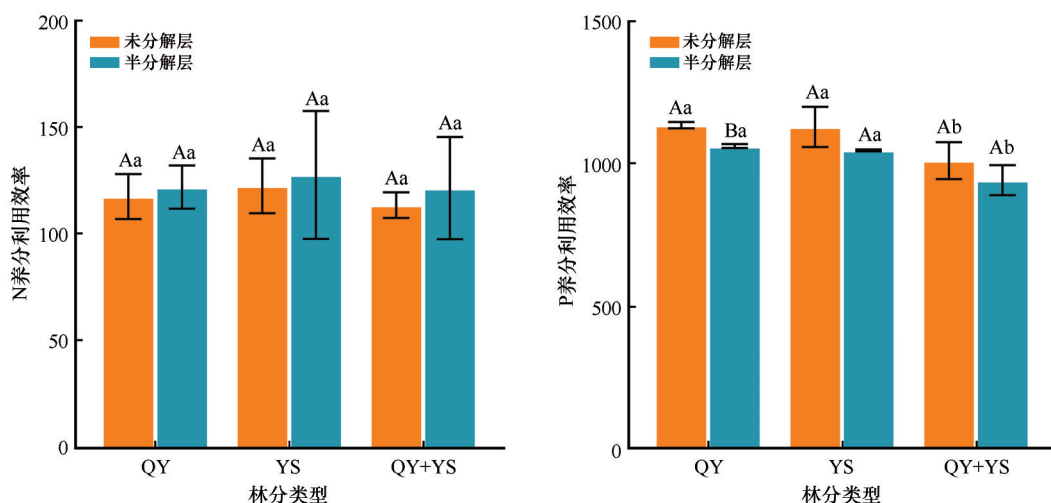
图 5 3 种林分类型(青海云杉纯林 QY, 油松纯林 YS, 青海云杉-油松混交林 QY+YS)不同分解层凋落物养分归还量

Fig.5 Nutrient return of litter in different decomposition layers of three forest types

2.3 土壤养分与凋落物质量的关系

3 种林分类型的土壤养分与凋落物各指标 RDA 分析结果如图 7 所示。在 0~10 cm 土层, 第一轴 (RDA1) 和第二轴 (RDA2) 分别解释了变量变异的 65.15% 和 24.92%, 未分解层 P 含量 (UP) 和未分解层 P 养分利用效率 (UPNUE) 以及未分解层 N/P (UN/P)、未分解层 C/P 值 (UC/P)、半分解层 P 养分利用效率 (SPNUE) 和半分解层 C/N 值 (SC/

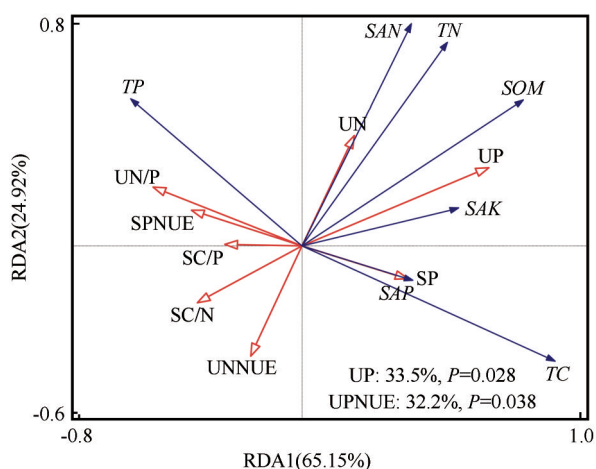
N) 的贡献率较大, 是影响土壤养分变化的关键因子。其中, UP 含量对土壤养分的影响最大, 呈显著正相关 ($P<0.05$), 解释了土壤养分变化的 33.5%; 其次是 UPNUE, 与土壤养分含量显著负相关 ($P<0.05$), 解释了土壤养分变化的 32.2%; 其余 UN/P、UC/P、SPNUE 和 SC/N 与土壤养分含量负相关, 分别解释了土壤养分变化的 20.6%、19.0%、15.7% 和 13.2%。



注:不同大写字母表示相同林分类型不同分解层间的差异显著,不同小写字母表示相同分解层不同林分类型间的差异显著($P<0.05$)

图6 3种林分类型(青海云杉纯林QY,油松纯林YS,青海云杉-油松混交林QY+YS)不同分解层凋落物养分利用效率

Fig.6 Nutrient use efficiency of litter in different decomposition layers of three forest types



注:UC:未分解层碳含量;UN:未分解层氮含量;UP:未分解层磷含量;UC/N:未分解层碳氮比;UC/P:未分解层碳磷比;UN/P:未分解层氮磷比;UNNUE:未分解层氮养分利用效率;UPNUE:未分解层磷养分利用效率;SC:半分解层碳含量;SN:半分解层氮含量;SP:半分解层磷含量;SC/N:半分解层碳氮比;SC/P:半分解层碳磷比;SN/P:半分解层氮磷比;SNNUE:半分解层氮养分利用效率;SPNUE:半分解层磷养分利用效率

图7 0~10 cm 土层土壤养分与凋落物质量和养分利用效率的冗余分析

Fig.7 Redundant analysis of soil nutrient and litter quality and nutrient use efficiency in 0~10 cm soil layer

3 讨论

3.1 不同林分类型土壤养分特征

不同林分类型凋落物的输入是森林土壤养分的重要来源和归还库,影响土壤的理化性质、结构和微生物组成等^[19,22]。本研究结果显示,3种林分类

型土壤有机质含量在0~10 cm 土层均显著高于其他土层($P<0.05$),其余土壤养分含量在各自林分类型中结果相似,即3种典型林分土壤养分含量整体上随土层深度的增加而显著降低($P<0.05$),且在0~10 cm 土层中最高,有表聚现象。其中,青海云杉-油松混交林的土壤养分含量(除速效磷含量外)高于纯林。这与其他研究结果一致,潘嘉雯等^[12]发现土壤养分含量集中在0~10 cm 土层,且土壤有机质和全氮含量表聚现象明显;Xu等^[23]对全球248个站点的237项研究结果的Meta分析表明,表土层(0~20 cm)碳含量和储量对凋落物的输入更敏感,且表土对土壤碳储量的影响显著大于底土(20~100 cm);蒋倩等^[24]、潘嘉雯等^[12]认为马尾松针阔混交林的凋落物储量和土壤养分含量高于纯林。这种表聚现象可能原因有二:一方面,土壤表层与有机层直接接触,而有机层主要由凋落物输入形成,因此表土层对凋落物的变化敏感;另一方面,森林凋落物在地表积聚且分解释放的养分与土壤表层首先接触,且植物根系在土壤表层分布居多,土壤动物和微生物比较丰富,有利于凋落物的分解和养分的回归,随着土层加深,根系分布和凋落物养分来源减少^[8,12-23]。本研究中青海云杉-油松混交林的土壤养分含量(除速效磷含量外)高于纯林,一方面,混交林的物种丰富度高于纯林,郁闭度大,导致混交林凋落物储量大于纯林,且分解速率高于纯林,从而使混交林有利于土壤养分的积累^[25-26];另一方面,除凋落物输入外,不同林分类型的根系分泌物差异可能进一步影响土壤养分循环。青海云杉与油松的根系可能通

过分泌有机酸、酚类化合物等物质改变根际微环境,促进难溶性磷的活化或提高养分可利用性,而混交林根系分泌物多样性较高,可能通过协同作用增强对土壤养分的活化能力^[27];此外生境异质性可能通过树种选择压力影响林分构建进而导致土壤养分差异,例如油松在干旱生境中可能通过增加细根分泌物以提高水分利用效率,从而间接改变根际养分有效性^[28]。

3.2 不同林分类型凋落物储量和质量特征

在相同的立地条件下,林分类型和群落物种组成是影响凋落物储量的重要因素^[14]。Feng等^[29]指出,不管是在物种水平还是全林分水平,多树种林分的地上生物量比单种林分分别高21.7%和25.5%。本研究与此结果相似,青海云杉-油松混交林的总凋落物储量显著大于云杉和油松纯林($P<0.05$)。可能原因在于,相较于纯林,混交林群落结构复杂、光合利用效率较高,林分生产力更高,相对应的凋落物更多^[14],其他一些生物和非生物环境差异也可能导致混交林和纯林的凋落物储量、质量和数量及其养分含量表现出差异^[8,30]。

林分类型可以通过改变凋落物储量、数量以及微生物群落结构等影响自身的养分含量^[31-32]。本研究发现,3种林分凋落物各分解层养分含量大小依次为 $TC>TN>TK>TP$,这与陈金磊等^[33]在亚热带丘陵区和陈毅青等^[30]在海南岛东南沿海地区关于不同林分凋落物分解层养分元素含量的研究结果一致。原因可能在于:一方面,C是叶片合成有机质的主要原料,主要用于植物的生长和代谢^[34];另一方面,凋落物在凋落前N元素、K元素和P元素发生了内转移且内转移量较大,K元素可能被淋溶而降低,P元素是可再利用元素在凋落前可能被转移到其他器官,使凋落物层P元素较少^[18,35]。本研究中3种林分类型各分解层凋落物N/P值为7.90~9.66,均小于14,这与余雅尧等^[18]的研究结果一致,说明这3种林分类型的生长受到N元素的限制^[18]。另外,青海云杉-油松混交林C/N、C/P、N/P均低于青海云杉和油松纯林,且全磷含量显著高于青海云杉和油松纯林,这与潘嘉雯等^[12]在鼎湖山的相关研究结果类似,说明一方面,混交林凋落物的化学组成可能呈现互补性,针叶凋落物通常具有较高的C/N和木质素含量等,分解较慢,而混交林可提供易分解的有

机质,两者混合后可能通过“激发效应”加速整体分解速率,影响了土壤养分含量^[36],这也可解释青海云杉-油松混交林土壤养分高于油松和青海云杉纯林的现象;另一方面,还可能与微生物群落结构有关,混交林凋落物较高的氮含量和较低的C/N可能更利于细菌主导的快速分解过程,而纯林凋落物高C/N可能促进真菌群落的定殖^[37]。针对同一林分类型,3种林分类型凋落物全碳含量和C/N、C/P值均表现为未分解层显著大于半分解层($P<0.05$),凋落物氮含量也有类似规律,这与潘嘉雯等^[12]和陈毅青等^[30]的相关研究结果类似,即凋落物碳、氮含量随着凋落物分解程度的加深而减少。原因在于一方面随着凋落物的分解,分解速率加快,可溶性糖和单宁等有机物质下降,使得C含量和C/N、C/P值下降^[6,30];另一方面,N素矿化较强,部分有机N转化为无机N,导致凋落物中N的流失和淋溶,另外半分解层凋落物与土壤接触密切,有利于微生物和土壤动物的分解和植物的吸收利用,使得N养分含量下降^[31,33]。3种林分类型凋落物钾元素含量与碳元素含量相反,即其含量在未分解层小于半分解层($P<0.05$),磷元素含量也有类似规律,即K、P元素含量随着凋落物分解程度的加深而逐渐富集,这与陈金磊等^[33]在亚热带丘陵区关于不同凋落物分解层养分元素含量的研究结果有所不同,可能原因在于一方面,两个研究区域气候和水热条件等的差异和林分类型的不同^[8];另一方面,可能与磷酸酶活性的空间分异有关^[37-38]。

凋落物养分归还量跟凋落物储量和养分含量相关^[39]。本研究中,3种林分养分归还量均表现为 $C>N>P$,与凋落物养分含量的大小规律一致,且在各分解层中青海云杉-油松混交林高于纯林,这与黄石德等^[16]在武夷山3种典型林分和李忠文等^[35]在亚热带典型针阔混交林中的相关研究结果一致,说明各林分类型能够保持稳定的养分来源且混交林优于纯林^[24]。原因可能在于林分类型的不同和树种本身的生物学特性和养分机制以及该区域的气候、温度、降水等环境因素造成凋落物储量和养分含量的差异,以及干旱胁迫与海拔梯度等生境异质性影响土壤动物活动及微生物分解功能,进而影响凋落物养分归还量^[39-40]。同时,林分类型也是解释凋落物养分释放率全球模式以及对气候变化的响应最有效的指标^[1]。本研究也得出凋落物P养分利用效

率在各分解层中均为纯林显著大于青海云杉-油松混交林($P<0.05$),说明纯林较混交林来说更易受到P元素的影响^[14],而青海云杉纯林凋落物P养分利用效率未分解层显著大于半分解层($P<0.05$),这一结果也证明了随着凋落物的分解P元素逐渐积累。

3.3 不同林分类型土壤养分与凋落物质量的关系

不同林分类型凋落物储量及养分含量反映了森林生态系统的养分输入和能量流动^[7,41-42],凋落物的分解和养分释放速率影响着凋落物养分的归还,从而影响土壤养分含量^[19]。本研究得出,0~10 cm土层凋落物UP含量和UPNUE以及UN/P、UC/P值、SPNUE和SC/N是影响土壤养分变化的关键因子,其中UP含量与土壤养分含量显著正相关($P<0.05$);UPNUE与土壤养分含量显著负相关($P<0.05$),即凋落物P养分利用效率越大,意味着P元素的限制就越强,导致土壤中P元素含量就降低^[14];其余UN/P、UC/P、SPNUE和SC/N与土壤养分含量负相关,分别解释了土壤养分变化的20.6%、19.0%、15.7%和13.2%,但不显著。这与潘嘉雯等^[12]和潘萍等^[19]的研究结果有异同,相同的是凋落物UC/P和SC/N与土壤养分含量负相关,且有19%和13.2%的解释率,因为凋落物UC/P和SC/N值越高,凋落物越不容易分解,则回归到土壤的养分就越少,土壤养分就越不容易积累;不同的是凋落物UC/P和SC/N值与土壤养分负相关关系不显著:一方面,土壤接近碳饱和,当土壤接近碳饱和时,凋落物质量(C/N和C/P等)不会再对这部分碳库产生影响^[43];另一方面,随着凋落物的不断分解,到分解后期,高质量的凋落物输入分解SOM(正激发效应),低质量的凋落物输入补充SOM(负激发效应),从而达到了分解与补充的权衡^[9]。

4 结论

宁夏罗山3种典型林分土壤养分特征与凋落物质量的关系密切,凋落物UP含量和UPNUE以及UN/P、UC/P值、SPNUE和SC/N是影响土壤养分变化的关键因子。其中,青海云杉-油松混交林凋落物各分解层C/N、C/P均小于纯林,说明青海云杉-油松混交林凋落物分解速率和养分释放速率高于纯林,导致土壤养分含量高于纯林;而N/P值在3种林分类型中均小于14,凋落物P养分利用效率在各分解层中均为纯林显著大于青海云杉-油松混交

林,说明宁夏罗山3种林分类型生长均受N元素的限制,且在N限制的阈值范围内纯林较青海云杉-油松混交林更易受P元素的影响。综上,青海云杉-油松混交林比纯林易于积累土壤养分,满足植物生长的养分需求,在土壤改善方面优于纯林,研究为量化评估干旱山地森林生态系统养分平衡和森林管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] Chen Z, Ni X, Patoine G, et al. Climate warming accelerates carbon release from foliar litter: a global synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(5): e17350.
- [2] 马转转, 张全智, 王传宽. 六种温带森林类型凋落物量长期动态及其环境驱动[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 7307-7316.
- [3] 陈晶亮, 杨慧, 刘超, 等. 宁夏罗山自然保护区3种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估[J]. *生态学报*, 2023, 43(19): 7987-7997.
- [4] 孙思琦, 裴晓娜, 韩锐, 等. 降解剂对森林凋落物可溶性有机碳含量的影响及凋落物降解模式比较研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 2005-2012.
- [5] Zhou Z, Lu J Z, Preiser J, et al. Plant roots fuel tropical soil animal communities[J]. *Ecology Letters*, 2023, 26(5): 742-753.
- [6] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6): 105-111.
- [7] Zhang W P, Fornara D, Yang H, et al. Plant litter strengthens positive biodiversity-ecosystem functioning relationships over time[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2023, 38(5): 473-484.
- [8] 崔雪, 王海燕, 邹佳何, 等. 长白山针阔混交林凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 91-99.
- [9] Lyu M, Homyak P M, Xie J, et al. Litter quality controls trade-offs in soil carbon decomposition and replenishment in a subtropical forest [J]. *Journal of Ecology*, 2023, 111(10): 2181-2193.
- [10] 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 1-9.
- [11] 袁菲, 张星耀, 梁军. 基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 964-973.
- [12] 潘嘉雯, 李吉跃, 何茜, 等. 马尾松两种林型土壤养分特征及其与凋落物质量的关系[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(2): 54-63.
- [13] 洪小敏, 魏强, 李梦娇, 等. 亚热带典型森林地上和地下凋落物输入对土壤新老有机碳动态平衡的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 825-835.
- [14] 张楠, 杨智杰, 胥超, 等. 中亚热带森林转换对凋落物养分归还及养分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 321-328.
- [15] Vitousek P M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests [J]. *Ecology*, 1984, 65(1): 285-298.

- [16] 黄石德,黄雍容,高伟,等.沿海拔梯度武夷山3种典型森林凋落物及养分归还动态[J].热带亚热带植物学报,2020,28(4):394-402.
- [17] 曹兵,汪泽鹏.宁夏罗山国家级自然保护区综合科学考察[M].银川:阳光出版社,2019.
- [18] 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].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(4):227-234.
- [19] 潘萍,赵芳,欧阳勋志,等.马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系[J].生态学报,2018,38(11):3988-3997.
- [20] 曹兵,秦伟春.宁夏罗山森林资源[M].银川:阳光出版社,2019.
- [21] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [22] 陈国平,程珊珊,丛明旸,等.三种阔叶林凋落物对下层土壤养分的影响[J].生态学杂志,2014,33(4):874-879.
- [23] Xu S, Sayer E J, Eisenhauer N, et al. Aboveground litter inputs determine carbon storage across soil profiles: a meta-analysis [J]. Plant and Soil, 2021, 462: 429-444.
- [24] 蒋倩,何淑勤,宫渊波.不同植被类型枯落物养分特征及其潜在归还能力[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):142-147.
- [25] 孙拥康,汤景明,王怡.亚热带日本落叶松人工林枯落物及土壤层水文效应[J].北京林业大学学报,2021,43(8):60-69.
- [26] Wan X, Joly F X, Jia H, et al. Functional identity drives tree species richness-induced increases in litterfall production and forest floor mass in young tree communities [J]. New Phytologist, 2023, 240(3): 1003-1014.
- [27] 李彦林,陈杨洋,杨霜溶,等.植物根系分泌的有机酸对土壤碳氮矿化的影响[J].生态环境学报,2024,33(9):1362-1371.
- [28] 何如梦.晋西黄土区人工油松林生长对干旱的响应[D].北京:北京林业大学,2021.
- [29] Feng Y H, Schmid B, Loreau M, et al. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions [J]. Science, 2022, 376(6595): 865-868.
- [30] 陈毅青,陈宗铸,陈小花,等.海南岛东南沿海地区不同森林类型林地凋落物现存量及养分特征[J].热带作物学报,2021,42(4):1159-1165.
- [31] 王鑫,罗雪萍,字洪标,等.青海森林凋落物生态化学计量特征及其影响因子[J].草业学报,2019,28(8):1-14.
- [32] Chen X, Taylor A R, Reich P B, et al. Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual [J]. Nature, 2023, 618(7963): 94-101.
- [33] 陈金磊,张仕吉,李雷达,等.亚热带不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量和养分特征[J].生态学报,2020,40(12):4073-4086.
- [34] 邢进梅,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山4种典型林分凋落物归还及养分动态变化特征[J].中南林业科技大学学报,2021,41(8):134-144.
- [35] 李忠文,闫文德,郑威,等.亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征[J].生态学报,2013,33(24):7707-7714.
- [36] 薛飞,龙翠玲,廖全兰,等.喀斯特森林凋落物对土壤养分及土壤酶的影响[J].森林与环境学报,2020,40(5):449-458.
- [37] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J].植物生态学报,2014,38(3):298-310.
- [38] Spohn M, Kuzyakov Y. Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation-Coupling soil zymography with ^{14}C imaging [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67: 106-113.
- [39] 刘璐,赵常明,徐文婷,等.神农架常绿落叶阔叶混交林凋落物养分特征[J].生态学报,2019,39(20):7611-7620.
- [40] 林文泉,高伟,叶功富,等.南亚热带海岸沙地不同林分凋落物量及养分归还[J].森林与环境学报,2019,39(3):225-231.
- [41] 王涛,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠人工防护林林下枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2021,30(4):700-707.
- [42] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J].生态学报,2019,39(7):2416-2425.
- [43] Castellano M J, Mueller K E, Olk D C, et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept [J]. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3200-3209.

Relationship between soil nutrient characteristics and litter quality of three typical stands in Luoshan, Ningxia, China

Chen Jingliang^{1,2}, Tan Songwei³, Liu Chao³, Huang Lei⁴

(1. Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Ningxia Luoshan National Nature Reserve Management Bureau, Wuzhong 751999, Ningxia, China; 4. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The litter layer and soil layer are important carriers of material cycling and energy flow in forest ecosystems. Quantifying the characteristics of forest soil nutrients and their relationship with litter quality and nutrient utilization efficiency is crucial for understanding nutrient cycling in arid mountain forest ecosystems and evaluating productivity. This study focused on pure forests of Qinghai spruce, pure pine forests, and Qinghai spruce-pine mixed forests in the Luoshan National Nature Reserve in Ningxia. Based on plot surveys and measurements of soil and litter samples, redundancy analysis (RDA) was used to elucidate the relationship between soil nutrient characteristics of three typical forest stands and litter quality and nutrient utilization efficiency. (1) The nutrient content in the soil of the three typical forest stands was significantly higher in the 0–10 cm layer than in the 10–20 cm and 20–40 cm layers ($P < 0.05$), with no significant difference between the 10–20 cm and 20–40 cm layers ($P > 0.05$). (2) The nutrient content in the litter decomposition layers of the three forest types followed the order of total $C > N > K > P$, and the total phosphorus content and litter storage of the Qinghai spruce-pine mixed forest were significantly higher than those of the pure forests ($P < 0.05$). (3) The C/N, C/P, and N/P ratios of litter in pure forests were all higher than those in the Qinghai spruce-pine mixed forest, with the C/N and C/P values in the undecomposed layer significantly higher than those in the semi-decomposed layer ($P < 0.05$). The N/P values were all less than 14, and the phosphorus nutrient utilization efficiency in pure forests was significantly higher than that in the Qinghai spruce-pine mixed forest ($P < 0.05$). (4) The return of nutrients from litter in the three forest types was in the order of $C > N > P$ in each decomposition layer, and the Qinghai spruce-pine mixed forest was higher than the pure forests. (5) RDA showed that the phosphorus content in the undecomposed layer of litter (UP), phosphorus nutrient utilization efficiency (UPNUE), nitrogen-phosphorus ratio (UN/P), carbon-phosphorus ratio (UC/P), and phosphorus nutrient utilization efficiency in the semi-decomposed layer (SPNUE), carbon-nitrogen ratio (SC/N) of litter in the 0–10 cm soil layer had a significant effect on the change of soil nutrient content. Soil nutrient content was significantly positively correlated with UP ($P < 0.05$), while significantly negatively correlated with UPNUE ($P < 0.05$). The Qinghai spruce-pine mixed forest is more advantageous than pure forests in soil nutrient accumulation to meet the nutrient requirements of plant growth. Nitrogen is the main limiting element for the three forest types. Within the range of nitrogen limitation, pure forests are more susceptible to the influence of phosphorus content than Qinghai spruce-pine mixed forests.

Key words: forest litter; soil nutrients; litter quality; nutrient return; nutrient use efficiency