

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.014

论文标题： 宁夏罗山4种混交群落植物-凋落物-土壤生态化学计量特征

作　　者： 杨盈盈，杨天宇，郭邵华，等

收稿日期： 2025-05-09

引文格式： 杨盈盈,杨天宇,郭邵华,等.宁夏罗山4种混交群落植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):137-148.

YANG Y Y, YANG T Y, GUO S H, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plant-litter-soil continuum in four mixed communities on Luo mountain, Ningxia[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):137-148.

相关论文推荐

Recommended articles

甘肃插岗梁自然保护区亚高山针叶林不同器官-地被物-土壤化学计量特征

Stoichiometric characteristics of different organs-litter-soil in subalpine coniferous forests in Chagangliang nature reserve

甘南白龙江3种次生林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征

Ecological stoichiometry of leaf-litter-soil continuum of three secondary forests in Bailongjiang, southern Gansu Province

广西不同林龄桉树人工林叶-凋落物-土壤 C、N、P生态化学计量特征

Ecological stoichiometric characteristics of C, N, and P of leaves, litter and soil in *Eucalyptus* plantations at different stand ages in Guangxi

金沙江干热河谷不同植被类型植物叶片碳氮磷生态化学计量特征

Ecological stoichiometry of leaf C, N and P of different vegetation types in the dry-hot valley of the Jinsha river

白于山区不同植物群落土壤碳氮磷空间分布及化学计量特征

Spatial distribution and stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different plant communities in Baiyu mountain areas

甘南白龙江3种次生林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征

Ecological stoichiometry of leaf-litter-soil continuum of three secondary forests in Bailongjiang, southern Gansu Province

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.014
http: //qks.csuft.edu.cn

宁夏罗山 4 种混交群落植物 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征

杨盈盈[1]，杨天宇[2]，郭邵华[1]，刘芳妤[1]，曹　兵[1]，杨君珑[1]，徐雪蕾[1]

（1. 宁夏大学 a. 林业与草业学院；b. 林木资源高效生产全国重点实验室，宁夏 银川 750021；
2. 宁夏沙坡头国家级自然保护区管理局，宁夏 中卫 755000）

摘　要：【目的】研究宁夏罗山混交群落植物各器官、凋落物、土壤生态化学计量特征及养分再吸收率与利用率，以揭示混交群落养分分配和利用策略，为罗山植被保护和合理经营提供科学依据。【方法】以宁夏罗山高山灌木混交群落、浅山灌木混交群落、针叶混交群落、针阔混交群落 4 种典型混交群落为研究对象，探讨植物叶、枝、根、凋落物，以及土壤 C、N、P 含量及其化学计量比的差异和相关关系，分析植物各器官与土壤间的耦合关系和内稳性特征，明晰各混交群落 C、N、P 养分再吸收率和利用率。【结果】1）各混交群落 C 含量在根中最低，N、P 含量在叶中最高。碳氮比（C/N）在叶中最低，碳磷比（C/P）在枝中最高，氮磷比（N/P）在根中最低。2 种灌木混交群落植物 P 含量低于 2 种乔木混交群落，而 C/P、N/P 高于乔木混交群落。2）针阔混交群落凋落物 C/N 显著高于高山灌木混交群落（F=7.72，P ＜ 0.05）。3）2 种乔木混交群落土壤 C、C/P（F=33.44，P ＜ 0.05；F=47.64，P ＜ 0.05）以及针叶混交群落土壤 N、N/P（F=17.76，P ＜ 0.05；F=55.00，P ＜ 0.05）均显著高于 2 种灌木混交群落。4）植物各器官、凋落物、土壤的 P 含量两两之间均呈显著正相关（P ＜ 0.05）。坡位和坡向对各组分生态化学计量特征的影响较大。叶、枝、根的 P、C/P、N/P 均为敏感型。5）2 种乔木混交群落的 N、P 再吸收率高于 2 种灌木混交群落。各混交群落 P 的养分利用率高于 N 和 C。【结论】2 种灌木混交群落的生长主要受 P 元素限制，而 2 种乔木混交群落的生长主要受 N 元素限制。P 元素在各组分间联系紧密，且利用率较高。

关键词：生态化学计量特征；混交群落；内稳性；养分再吸收率与利用率；宁夏罗山

中图分类号：S718.43　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0137-12

Ecological stoichiometric characteristics of plant-litter-soil continuum in four mixed communities on Luo mountain, Ningxia

YANG Yingying[1], YANG Tianyu[2], GUO Shaohua[1], LIU Fangyu[1], CAO Bing[1], YANG Junlong[1], XU Xuelei[1]

(1.a. School of Forestry and Grassland Science; b. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Administration of Shapotou National Nature Reserve, Zhongwei 755000, Ningxia, China)

Abstract:【Objective】This study investigated the ecological stoichiometric characteristics of the plant-litter-soil continuum, as well as nutrient resorption and utilization efficiency, in mixed communities of Luo mountain, Ningxia, to reveal the nutrient allocation and utilization strategies, and to provide a scientific foundation for vegetation protection and sustainable management in this region. 【Method】 Four typical mixed communities were investigated: mixed alpine shrub community, mixed low-mountain shrub community, mixed coniferous community and mixed conifer-broadleaf community. This study systematically analyzed the differences in C, N, P contents, and stoichiometric ratios across plant organs, litter and soil. It quantified their coupling relationships, homeostasis, resorption and utilization efficiencies of C, N, and P nutrients.【Result】1) Across all communities, the C content was lowest in roots, while the N and P contents were the highest in leaves. The C/N was the lowest in leaves; The C/P was the highest in branches; And the N/P was

收稿日期（Received）：2025-05-09　　**修订日期**（Revised）：2025-07-08
基金项目：国家自然科学基金项目（32260421）；宁夏青年科技托举人才培养项目。
第一作者：杨盈盈（1735484852@qq.com），硕士研究生。
通信作者：徐雪蕾（xuxuelei @ nxu.edu.cn），副教授，博士，硕士研究生导师。
引文格式：杨盈盈 , 杨天宇 , 郭邵华 , 等 . 宁夏罗山 4 种混交群落植物 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(5):137-148.
YANG Y Y, YANG T Y, GUO S H, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plant-litter-soil continuum in four mixed communities on Luo mountain, Ningxia[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):137-148.

the lowest in roots. In addition, the plant P content was lower in the two shrub mixed communities compared to the two tree mixed communities, while the C/P and N/P were higher; 2) The litter C/N of the mixed conifer-broadleaf community was significantly higher than that in the mixed alpine shrub community (F=7.72, $P < 0.05$); 3) Soil C and C/P (F=33.44, $P < 0.05$; F=47.64, $P < 0.05$) in the two mixed tree communities, and soil N and N/P (F=17.76, $P < 0.05$; F=55.00, $P < 0.05$) in the mixed coniferous community were all significantly higher than in the two mixed shrub communities; 4) Significant positive correlations were found in P content across plant organs, litter, and soil ($P < 0.05$). Position and aspect significantly influenced ecological stoichiometric characteristics. The homeostasis of P, C/P, and N/P in leaves, branches, and roots was found to be sensitive; 5) The N and P reabsorption efficiency was stronger in the two mixed tree communities compared to the two mixed shrub communities. The nutrient utilization efficiency of P was higher than that of N and C across all communities.【Conclusion】Plant growth in mixed shrub communities was P-limited, while mixed tree communities were N-limited. P exhibited strong interconnections among components and higher utilization efficiency.

Keywords: ecological stoichiometric characteristics; mixed communities; homeostasis; nutrient resorption and utilization efficiency; Luo mountain in Ningxia

生态化学计量学聚焦于生态过程中营养元素间的相互作用与平衡，是评价生物地球化学循环和生态系统营养状况的重要方法 [1]，也为研究碳（C）、氮（N）、磷（P）元素在陆地生态系统中的相互耦合关系提供新思路 [2]。C、N、P 元素作为影响生物地球化学循环和生态系统功能的重要元素，其计量关系在维系生态系统结构和功能中发挥重要作用 [3]。植物不同器官的生态化学计量特征是了解植物生长繁殖与更新恢复过程中养分循环利用情况的重要指标 [4]；凋落物的生态化学计量特征能够反映植物对养分的重吸收能力及生态系统养分循环状况 [5]；土壤的生态化学计量特征揭示土壤化学元素的可获得性、循环过程、平衡机制及植被养分的限制性 [6]。植物、凋落物和土壤作为生态系统重要组分，三者相互作用且联系紧密 [2]，C、N、P 在各组分之间相互转换并形成植物 - 凋落物 - 土壤连续体 [7]。近年来，已有大量研究针对植物叶片 - 凋落物 - 土壤系统，系统探讨其生态化学计量特征及内在调控机制。例如，王飞等 [8] 对甘南白龙江 3 种次生林的研究发现 C、N、P 含量均表现为叶片＞凋落物＞土壤。张雨鉴等 [2] 对滇中亚高山森林植物的研究得出，5 种森林类型的碳氮比、碳磷比、氮磷比均表现为凋落叶＞植物叶＞土壤；刘姝萱等 [7] 在氮磷添加条件下对荒漠草原植物的研究发现，植物 N、P、氮磷比与凋落物和土壤的 N、P、氮磷比呈显著正相关，凋落物 P、碳氮比与植物和土壤碳磷比、氮磷比呈显著负相关。生态化学计量内稳性及养分再吸收率和利用率是探讨植物 - 凋落物 - 土壤连续体养分变化的关键，对于揭示养分循环规律及养分平衡特征具有重要意义 [2]。俞月凤等 [9] 对不同器官的内稳性研究发现，灌草 N 表现出较高的内稳性，表明限制元素在植物体内的含量具有相对稳定性，对环境变化的响应较为稳定。姜俊等 [10] 指出，不同林分密度的侧柏林中 N 再吸收率明显低于 P 再吸收率。但目前的研究主要关注叶片、凋落物和土壤化学计量特征，对植物其他器官如枝、根化学计量特征及其与凋落物和土壤之间的关系研究较为匮乏，亟需进一步探究，以阐明养分在植物各器官以及凋落物和土壤之间的分配策略与循环特征 [1]。

宁夏罗山国家级自然保护区地处毛乌素沙地南缘的荒漠草原过渡带，是宁夏中部干旱带重要的生态屏障和水源涵养区，具有维持生物多样性和调节区域气候等重要生态功能 [11]。该区域内物种单一、群落结构简单，易引发土壤退化，造成生态系统稳定性下降，更凸显了开展相关研究的紧迫性。混交林群落具有改善土壤肥力和养分循环、增强生态系统抗逆性与稳定性等优势 [12]。因此，对混交群落开展研究可为科学合理地保护与管理罗山典型混交群落提供理论依据。目前，前人已开展了凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估 [13]、叶功能性状及其环境响应机制 [14]、土壤活性有机碳组分 [15] 等方面的研究，但对混交群落植物各器官、凋落物、土壤生态化学计量特征及其关系的研究仍较为缺乏。因此，本研究以高山灌木混交群落、浅山灌木混交群落、针叶混交群落、针阔混交群落 4 种罗山典型的混交群落为研究对象，探究混交群落植物叶、枝、根、凋落物、土壤的 C、N、P 含量及化学计量特征的差异及其相关关系，明确混交群落的内稳性及养分再吸收率与利用率，以揭示罗山混交群落植物养分在各器官、凋落物、土壤之间的分配策略和利用规律，为罗山生态系统的恢复与合理经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏罗山南北长 36 km、东西宽 18 km，海拔

1 502.6 ～ 2 614.8 m。该区域属于中温带干旱大陆性气候，干燥少雨，且降水季节分配不均，降水主要集中在 7—9 月，年平均降水量为 296.7 mm，年平均蒸发量为 2 467.3 mm，蒸发量远大于降水量。区域年平均气温 8.8 ℃，无霜期为 130 ～ 150 d，平均日照时数达 2 881.5 h[16]。植被类型以森林、灌丛和草地为主，土壤类型以山地灰钙土和山地灰褐土为主 [17]。

1.2　样地设置

2022 年 7—8 月，在宁夏罗山区域内对典型混交群落进行样地设置，结合区域植被分布特征，分别选取高山灌木混交群落、浅山灌木混交群落、针叶混交群落及针阔混交群落 4 种典型混交群落类型。为减少其他环境因子对研究结果的影响，尽可能选择海拔等环境因子相对一致的地方布设样地。2 种灌木混交群落设置 10 m×10 m 的样地，2 种乔木混交群落设置 20 m×20 m 的样地，每种群落设置 3 个重复样地，共布设 12 个样地。样地布设完成后，详细记录每个样地的海拔、坡度、坡位及优势物种等信息，样地基本概况见表 1。

1.3　样品采集与测定

2022 年 7—8 月进行植物叶、枝、根、凋落物、土壤样品的采集。在每个样地内，针对优势物种分别随机选择 10 株标准植株，在每株植物个体的中上部沿 4 个方向采集健康成熟的叶、枝样品，并沿 4 个方向挖取细根（＜ 2 mm），将每个样地内优势物种的叶、枝、根样品分别混合装入袋中 [8]。在每个样地内，以“S”形设置 5 个 1 m×1 m 的小样方，全面收集每个小样方内的凋落物（包括枯枝、落叶、残体等）；同时，在每个小样方内向下挖取 0 ～ 10 cm 土层的土壤样品，去除土壤中夹杂的石块、杂草、根系等杂质。采集完成后，凋落物和土壤样品按样地分别混合均匀并装入袋中，用于后续指标的测定。

将采集的样品带回实验室，叶、枝样品先于 105 ℃下杀青 1 h，再同凋落物样品一并置于 80 ℃烘箱中烘干至恒质量。土壤样品经自然风干后，去除碎石等杂物。将所有叶、枝、根、凋落物、土壤样品进行粉碎研磨，并过 0.25 mm 孔径筛 [18]。所有样品的 C、N、P 含量分别采用重铬酸钾外加热法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法进行测定 [1]。用碱解扩散法测定土壤碱解氮（AN）含量，用碳酸氢钠浸提法测定土壤有效磷（AP）含量 [19]。

1.4　数据分析

采用 Excel 2019 软件对数据进行初步整理与计算。为控制海拔对各组分生态化学计量特征的影响，本研究运用协方差分析（ANCOVA），以海拔为协变量，系统分析各混交群落之间化学计量特征的差异性。采用单因素协方差分析及多重比较（LSD）分析不同混交群落植物叶、枝、根、凋落物、土壤生态化学计量特征的差异及同一混交群落不同器官生态化学计量特征的差异。采用双因素协方差分析法，分析各器官、群落及其交互作用对植物生态化学计量特征的影响，明确各因素及其交互效应在调控植物生态化学计量特征中的作用。

表 1　样地基本信息 †

Table 1　Basic information of sample plot

样地号 Plot ID	海拔 Elevation /m	坡度 Slope	坡位 Position	坡向 Aspect	纬度 Latitude	经度 Longitude	优势物种 Dominant species
H1	2 113.80	19.0°	中坡位	NW 310°	37°15′57″	106°16′33″	准格尔栒子 *Cotoneaster soongoricus*、贝加尔针茅 *Stipa baicalensis*、丁香 *Syringa oblata*、苔草 *Carex tristachya*、虎榛子 *Ostryopsis davidian*、冷蒿 *Artemisia frigida*
H2	2 128.25	21.5°	中坡位	NW 308°	37°15′56″	106°16′33″	
H3	2 125.23	23.0°	中坡位	NW 322°	37°15′55″	106°16′34″	
L1	1 951.26	18.0°	下坡位	NW 316°	37°20′30″	106°18′02″	准格尔栒子、丁香、苔草、贝加尔针茅
L2	1 941.38	19.0°	下坡位	NW 317°	37°24′35″	106°24′49″	
L3	1 940.59	19.0°	下坡位	NW 328°	37°20′28″	106°18′01″	
Y1	2 187.20	24.0°	上坡位	NE 64°	37°21′09″	106°23′57″	青海云杉 *Picea crassifolia*、油松 *Pinus tabuliformis*、丁香、全缘栒子 *Cotoneaster integerrimus*、糙苏 *Phlomis umbrosa*、玉竹 *Polygonatum odoratum*、黑果栒子 *Cotoneaster melanocarpus*、美蔷薇 *Rosa bella*
Y2	2 192.90	17.0°	上坡位	NE 45°	37°18′43″	106°17′42″	
Y3	2 217.59	19.5°	上坡位	NE 38°	37°18′45″	106°17′38″	
S1	2 267.00	35.0°	上坡位	NW 298°	37°16′41″	106°16′56″	山杨 *Populus davidiana*、油松、丁香、虎榛子、全缘栒子、蒙古荚蒾 *Viburnum mongolicum*、玉竹、毛叶水栒子 *Cotoneaster submultiflorus*、单瓣黄刺玫 *Rosa xanthina*
S2	2 167.84	30.1°	中坡位	E 327°	37°18′36″	106°17′58″	
S3	2 166.35	30.5°	中坡位	E 110°	37°18′37″	106°17′58″	

† H. 高山灌木混交群落；L. 浅山灌木混交群落；Y. 针叶混交群落；S. 针阔混交群落。下同。
H. Mixed alpine shrub community; L. Mixed shallow mountain shrub community; Y. Mixed conifer community; S. Mixed conifer-deciduous community. The same below.

采用 Pearson 相关性分析法，分析各器官、凋落物、土壤之间生态化学计量特征的关系，明确各组分间生态化学计量特征的关联程度及相互作用关系。采用冗余分析（RDA）法，分析各组分生态化学计量特征及其与环境因子之间的关系。上述分析运用 R 语言中的“ancova”“aov”“cor”“vegan”函数和程序包完成。图表制作则借助 Origin 2021 和 Canoco 5.0 软件完成。

植物内稳性运用内稳性模型公式计算得出，具体公式为 $y=cx^{1/H}$。式中：x 为土壤养分含量或化学计量比；y 为植物器官养分含量或化学计量比；c 为常数；H 为内稳性指数。回归关系不显著（$P>0.1$）时，植物被定义为绝对稳态。回归分析显著（$P\leqslant 0.1$）时，按内稳性指数可将植物划分为 4 种类型：$H>4$ 为稳态型；$2<H\leqslant 4$ 为弱稳态型；$4/3<H\leqslant 2$ 为弱敏感型；$H\leqslant 4/3$ 为敏感型 [9,20]。

植物养分再吸收率计算公式见文献 [21]。养分利用效率计算公式见文献 [22]。

2 结果与分析

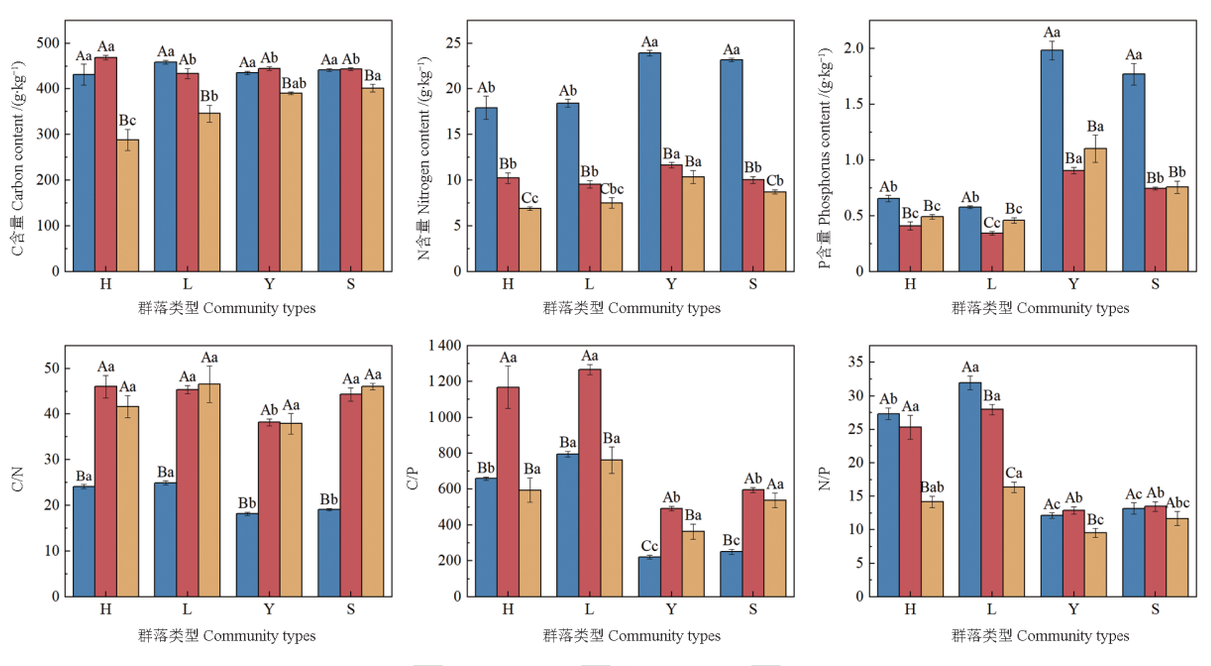
2.1 混交群落植物叶、枝、根生态化学计量特征差异

由表 2 可知，群落类型和器官对植物 C、N、P 含量及其化学计量比均有显著影响。群落类型与器官的交互作用除对碳氮比（C/N）没有显著影响外，对植物其余养分含量及化学计量比均有显著影响。如图 1 所示，各混交群落叶、枝 C 含量均显著高于根，叶 N、P 含量均显著高于枝和根，而枝、根的 C/N 及枝的碳磷比（C/P）均显著高于叶。此外，高山灌木混交群落枝 C 含量显著高于其余混交群落，而根 C 含量显著低于其余混交群落。针叶混交群落枝、根 N 含量显著高于其余混交群落。2 种灌木混交群落叶、枝、根 P 含量均显著低于 2 种乔木混交群落；2 种乔木混交群落叶和枝的 C/P、氮磷比（N/P）均显著低于 2 种灌木混交群落。

表 2 群落类型、器官及交互作用对植物生态化学计量特征的影响

Table 2 Effects of community types, organs, and interactions on plant ecological stoichiometric characteristics

变量 Variables	群落类型 Community types		器官 Plant organs		交互作用 Interaction effects	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
C	3.50	0.032	70.17	＜ 0.001	8.05	＜ 0.001
N	14.98	＜ 0.001	585.93	＜ 0.001	6.01	＜ 0.001
P	62.00	＜ 0.001	144.80	＜ 0.001	22.30	＜ 0.001
C/N	5.25	0.001	194.96	＜ 0.001	1.54	0.211
C/P	23.55	＜ 0.001	70.11	＜ 0.001	7.05	＜ 0.001
N/P	38.90	＜ 0.001	87.70	＜ 0.001	15.50	＜ 0.001



不同大写字母表示同一混交群落不同器官之间生态化学计量特征存在显著差异（$P<0.05$）；不同小写字母表示不同混交群落同一器官生态化学计量特征存在显著差异（$P<0.05$）。

Different uppercase letters indicate differences in stoichiometric characteristics among different organs within the same mixed community ($P<0.05$); different lowercase letters represent variations in stoichiometric characteristics of the same organ across different mixed communities ($P<0.05$).

图 1 不同混交群落叶、枝、根化学计量特征差异

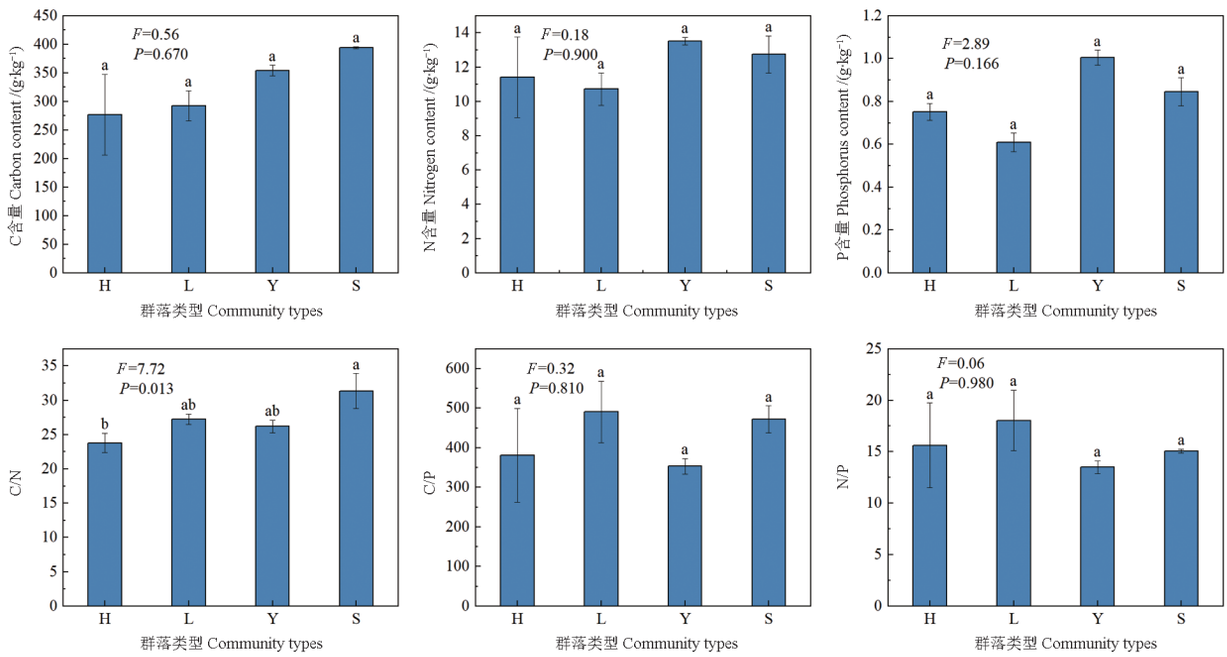
Fig. 1 Differences in stoichiometric characteristics of leaves, branches, and roots in different mixed communities

2.2　混交群落凋落物生态化学计量特征

由图 2 可知，2 种乔木混交群落凋落物 C、N、P 含量均高于 2 种灌木混交群落；浅山灌木混交群落、针阔混交群落凋落物的 C/N、C/P 分别大于高山灌木混交群落、针叶混交群落；2 种灌木混交群落凋落物的 N/P 大于 2 种乔木混交群落；针阔混交群落凋落物的 C/N 显著高于高山灌木混交群落（F=7.72，P ＜ 0.05）。

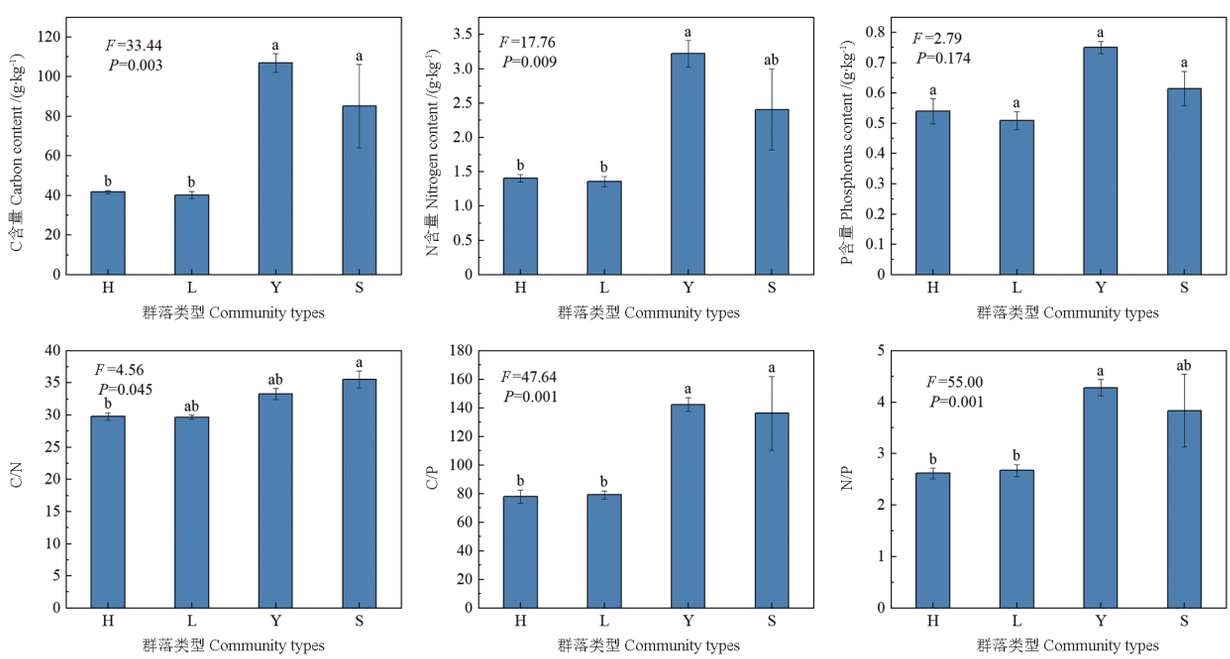
2.3　混交群落土壤生态化学计量特征

由图 3 可知，2 种乔木混交群落土壤 C 含量、C/P 均显著高于 2 种灌木混交群落（F=33.44，P ＜ 0.05；F=47.64，P ＜ 0.05）；针叶混交群



不同小写字母表示不同混交群落凋落物生态化学计量特征存在显著差异（P ＜ 0.05）。
Different lowercase letters indicate differences in the stoichiometric characteristics of litter among various mixed communities (P ＜ 0.05).

图 2　混交群落凋落物生态化学计量特征
Fig. 2　Ecological stoichiometric characteristics of litter in mixed communities



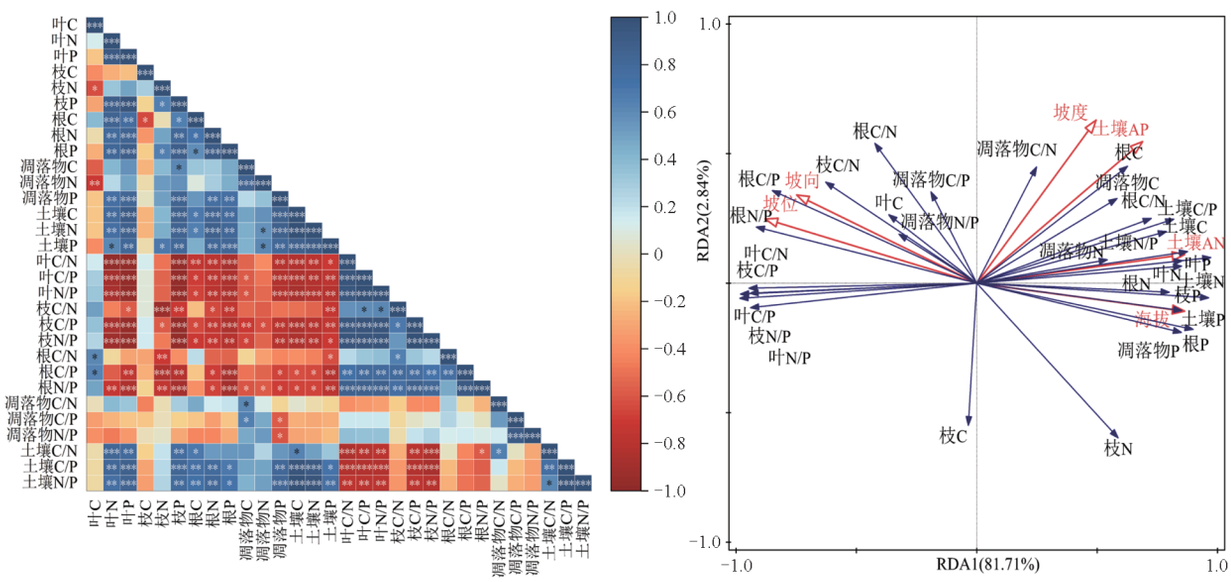
不同小写字母表示不同混交群落土壤生态化学计量特征存在显著差异（P ＜ 0.05）。
Different lowercase letters represent the differences in soil ecological stoichiometry characteristics of different mixed communities (P ＜ 0.05).

图 3　混交群落土壤生态化学计量特征
Fig. 3　Soil ecological stoichiometric characteristics of mixed communities

落土壤 N 含量、N/P 显著高于 2 种灌木混交群落（F=17.76，P < 0.05；F=55.00，P < 0.05）；各混交群落土壤 P 含量无显著差异（P > 0.05）；针阔混交群落土壤 C/N 显著高于高山灌木混交群落（F=4.56，P < 0.05）。

2.4 混交群落植物器官、凋落物、土壤生态化学计量特征的相关关系

由图 4 可知，叶、枝、根之间的 P 极显著正相关（P < 0.001）。叶、枝、根的 N 与 P 均呈显著正相关（P < 0.05）。叶的 C/N、C/P、N/P 与枝和根的 C/P、N/P 呈极显著正相关（P < 0.01）。叶、根的 N、P 和枝 P 与凋落物 P 呈极显著正相关（P < 0.01）。叶、枝 C/P、N/P 和根 N/P 与凋落物 C、P 呈显著负相关（P < 0.05）。叶、根的 N、P 和枝 P 均与土壤 C、N、P 呈显著正相关（P < 0.05）。叶、枝、根的 C/P、N/P 与土壤 C、N、P 呈显著负相关（P < 0.05）。叶的 C/N、C/P、N/P 和枝的 C/P、N/P 与土壤 C/N、C/P、N/P 呈极显著负相关（P < 0.01）。土壤 C、N、P、C/P、N/P 与凋落物 P 呈极显著正相关（P < 0.01），土壤 N、P 与凋落物 N 呈显著正相关（P < 0.05）。



*, P < 0.05; **, P < 0.01; ***, P < 0.001.

图 4 混交群落植物器官、凋落物、土壤生态化学计量特征的相关性

Fig. 4 Correlation of stoichiometric characteristics of plant organs, litter, and soil ecology in mixed communities

环境因子对叶、枝、根、凋落物和土壤生态化学计量特征变异的方差解释率在第一、第二轴上分别为 81.71% 和 2.84%（图 4），环境因子的解释率表现为坡位＞坡向＞坡度＞土壤 AP ＞土壤 AN ＞海拔（表 3）。

表 3 影响因子对各组分生态化学计量特征的影响

Table 3 The effect of influencing factors on the ecological stoichiometric characteristics of each component

影响因子 Influencing factors	解释率 Interpretation rate /%	F	P
坡位 Position	63.50	17.40	0.002
坡度 Slope	5.90	1.70	0.196
坡向 Aspect	13.80	6.60	0.014
土壤有效磷 Soil AP	2.20	1.00	0.382
土壤碱解氮 Soil AN	1.20	0.50	0.648
海拔 Elevation	0.30	0.10	0.936

2.5 混交群落内稳性及养分再吸收率和利用率

由表 4 可知，混交群落除叶 C，枝 C、N、C/N、根 C/N 为绝对稳态外，其余叶、枝、根养分含量及化学计量比均为敏感型。

由图 5 可知，2 种乔木混交群落 P 养分再吸收率显著高于 2 种灌木混交群落（F=30.61，P < 0.05）；2 种灌木混交群落 N、P 利用率显著高于 2 种乔木混交群落（F=5.11，P < 0.05；F=65.21，P < 0.05）；C、N 养分再吸收率和 C 利用率在各混交群落间无显著差异。

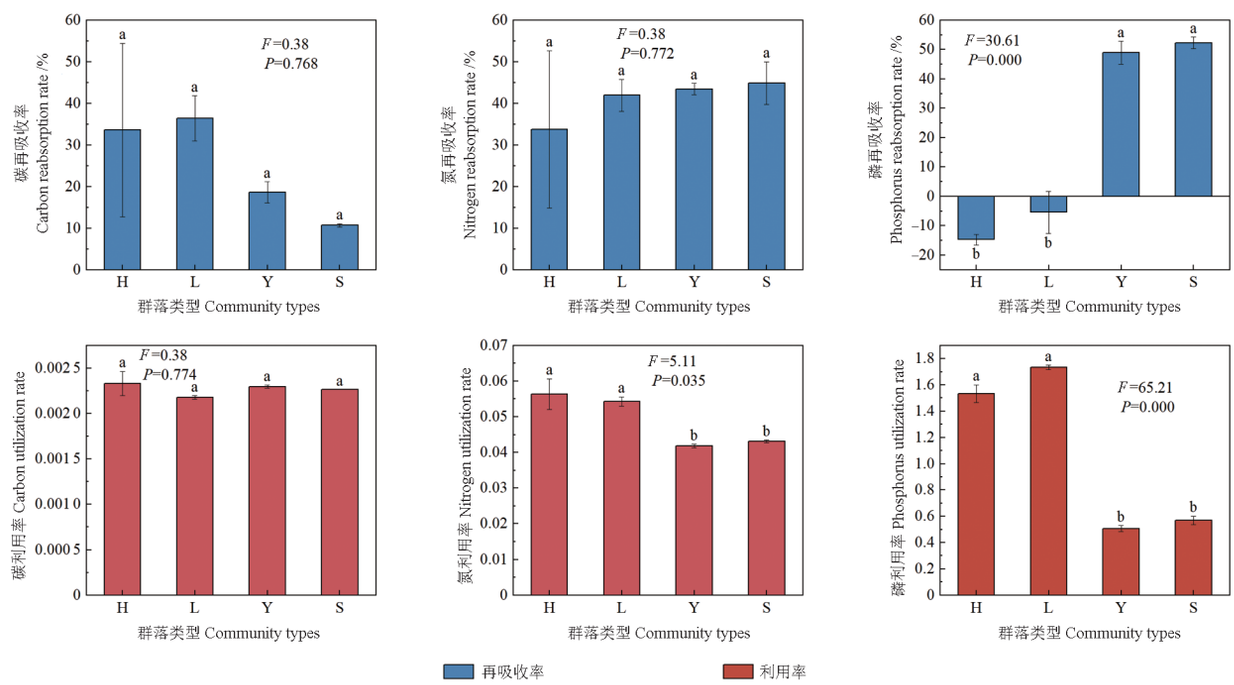
3 讨 论

3.1 混交群落植物器官生态化学计量特征

自然选择过程中，植物通过优化资源配置来适应环境变化，不同器官在结构和功能上产生分化，进而导致养分分配和利用策略出现差异 [9,23]。

表 4　混交群落内稳性
Table 4　Homeostasis of mixed communities

变量 Variables	叶 Leaf			枝 Branch			根 Root		
	H	*P*	内稳性类型 Homeostasis types	*H*	*P*	内稳性类型 Homeostasis types	*H*	*P*	内稳性类型 Homeostasis types
C	8.77	0.563	绝对稳态	8.26	0.441	绝对稳态	0.95	0.012	敏感型
N	0.42	0.006	敏感型	1.99	0.137	绝对稳态	0.69	＜ 0.001	敏感型
P	0.21	0.002	敏感型	0.56	0.001	敏感型	0.47	＜ 0.001	敏感型
C/N	1.08	＜ 0.001	敏感型	2.70	0.400	绝对稳态	30.30	0.956	绝对稳态
C/P	0.17	＜ 0.001	敏感型	0.12	＜ 0.001	敏感型	0.44	0.099	敏感型
N/P	0.13	0.002	敏感型	0.16	0.001	敏感型	0.58	0.067	敏感型



不同小写字母表示不同混交群落养分再吸收率、养分利用率存在显著差异（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters indicate differences in nutrient reabsorption rates and nutrient utilization rates among different mixed communities ($P < 0.05$).

图 5　混交群落养分再吸收率和利用率
Fig. 5　Nutrient reuptake rate and utilization efficiency of mixed communities

植物各器官化学计量特征之间的权衡关系，反映了植物在不同生境下获取资源与分配养分的调控策略 [24]。通常较高的叶 C 含量可能反映出对环境压力的防御能力更强 [25]。本研究中浅山灌木混交群落叶 C 含量最高，表明其对外界不利环境的防御能力可能更强。本研究中，植物 N、P 含量均在叶中最高，这与温晨等 [1] 对半干旱黄土小流域不同植被类型植物的研究、俞月凤等 [9] 对桂西北喀斯特地区退化群落的研究以及董雪等 [24] 对干旱区降水梯度条件下沙冬青的研究结论一致。这表明光合器官（叶片）中的 N、P 含量显著高于非光合器官（枝和根）[26]，其原因在于，植物生长旺盛期为了保证叶片较高的新陈代谢速率，会将体内更多的养分优先分配给叶片 [24]，以支撑光合作用、呼吸和水分利用等关键生理过程 [27-28]。

植物叶片碳氮比（C/N）、碳磷比（C/P）是反映植物生长的重要指标，通常与植物生长速率成反比 [1]。本研究结果显示，植物叶片 C/N、C/P 均表现为浅山灌木混交群落＞高山灌木混交群落＞针阔混交群落＞针叶混交群落，这表明浅山灌木混交群落的生长速率最慢，而针叶混交群落生长速率最快。植物叶片氮磷比（N/P）是判断植物养分限制状况的核心指标。具体而言，当叶片 N/P ＜ 14 时，植物生长主要受 N 限制；当叶片 N/P ＞ 16 时，植物生长主要受 P 限制；当 N/P 为 14 ～ 16 时，植物生长受 N 和 P 共同限制 [29]。本研究中，2 种灌木混交群落叶 N/P 均大于 16，植物生长受 P 限制；而 2 种乔木混交群落叶 N/P 均＜ 14，植物生长受 N 限制。这表明罗山不同混交群落植物对营养元素的分配利用存在差异，一

方面受植物遗传特性的影响，另一方面不同混交群落植物已形成适应不同自然环境的独特生理生态特性 [23]。

3.2 混交群落凋落物生态化学计量特征

凋落物是联系植物体和土壤的载体，其 C、N、P 水平在一定程度上可以反映植物对养分的利用效率以及土壤养分的供应状况 [30]。有研究指出，当凋落物 N 含量超过 10 g/kg 或 P 含量超过 0.8 g/kg 时，表明凋落物中的 N 和 P 未被植物完全吸收；相反，当凋落物 N 含量和 P 含量分别低于 7 g/kg 和 0.5 g/kg 时，说明凋落物中的 N、P 已被植物完全吸收 [7,31]。本研究中，各混交群落 N 含量均大于 10 g/kg，说明凋落物中的 N 未被植物完全吸收；2 种乔木混交群落 P 含量均大于 0.8 g/kg，表明其凋落物中 P 未被植物完全吸收。

凋落物作为连接植物与土壤的关键纽带，其化学计量特征直接影响养分循环速率 [32]。研究指出，凋落物 C/N 可以反映其分解和储存养分的能力，与其分解速率呈负相关 [33]。本研究中，凋落物的 C/N 表现为针阔混交群落＞浅山灌木混交群落＞针叶混交群落＞高山灌木混交群落，这意味着针阔混交群落凋落物的分解速率最低，而高山灌木混交群落凋落物的分解速率最高。此外，凋落物的 C/N 小于 40 或 C/P 小于 600，表明凋落物中的 N 和 P 含量丰富，有利于其被微生物更快地分解，本研究各混交群落凋落物的 C/N 和 C/P 均明显低于阈值，表明凋落物可以更快地被微生物分解和利用，因此，在一定程度上加速了营养物质的周转和循环 [34]。有研究指出，凋落物的 N/P 越高，表明凋落物的分解受到 P 元素限制就越强，特别是当凋落物的 N/P 大于 25 或 P 含量低于 0.22 g/kg 时 [35]，本研究各混交群落凋落物 N/P 均低于 25，意味着罗山混交群落凋落物分解受到 P 的限制较小。

3.3 混交群落土壤生态化学计量特征

土壤是植物吸收各种营养元素的载体，其理化性质和化学计量会直接影响植物的养分含量和生长发育 [9]。本研究中各混交群落土壤整体 C 含量为 68.52 g/kg，N 含量为 2.10 g/kg，均高于全国土壤平均水平（C，11.12 g/kg；N，1.06 g/kg）；而 P 含量为 0.60 g/kg，低于全国土壤平均水平（0.65 g/kg）[36] 和全球土壤平均水平（2.80 g/kg）[37]。可见，罗山土壤整体存在缺 P 的现象，这主要是由于研究区干旱少雨的气候条件不利于岩石风化，进而导致土壤中 P 含量偏低 [36]。此外，土壤 C/N、C/P、N/P 是衡量土壤质量的重要指标，其中土壤 C/N 是衡量土壤 N 矿化能力的重要指标，一般来说，C/N 越大，对 N 矿化、养分释放及植物吸收利用就越不利 [38]。本研究中各混交群落土壤 C/N 均大于全国土壤 C/N 平均水平（11.9）[39]，意味着这些群落土壤的养分释放及植物吸收和利用能力均低于全国水平。另外，土壤 C/N 也用于判断土壤中有机物的分解程度。有研究表明，当 C/N 大于 25 时，土壤中有机质的积累速率大于分解速率；当 C/N 为 12 ～ 16 时，土壤中的微生物已经很好地分解了有机质，并且很难再积累更多的有机质 [40]。本研究中各混交群落土壤 C/N 均大于 25，表明这些群落土壤中有机质的积累速率大于分解速率。此外，土壤 C/P 是衡量土壤 P 矿化能力的关键指标，可以表明在有机质矿化过程中释放 P 或吸收和保留 P 的潜力。C/P 越低，土壤 P 的利用率越高；C/P 越高，有机质分解过程中释放的养分就越少 [38]。本研究中各混交群落土壤 C/P 均大于全国土壤 C/P（52.7）[39]，说明这些群落土壤 P 的利用率较低，从有机质分解过程中释放的养分也低于全国水平。研究指出，C/P 小于 200 表示有机磷的净矿化，而 C/P 大于 300 和在 200 ～ 300 之间分别表示有机磷酸盐的净固定和可溶性磷含量几乎没有变化 [41]。本研究中各混交群落土壤 C/P 均小于 200，则意味着各混交群落土壤有机磷发生净矿化。

3.4 混交群落植物器官、凋落物、土壤生态化学计量特征的相关关系

相关性分析可以揭示不同组分 C、N、P 化学计量变量之间的协调关系和养分之间的耦合过程 [42]。本研究中，叶 N 与叶 P 呈极显著正相关（$P < 0.001$），这与高等陆生植物叶片 N 与 P 呈正相关性的普遍规律吻合，表明叶片 N、P 元素变化具有协同性，体现了叶片属性间的经济策略 [36]。同时，本研究发现植物叶片和根的 N 与 P 呈极显著正相关（$P < 0.001$），叶、枝、根的 P 两两之间均呈极显著正相关（$P < 0.001$），这与已有研究结果一致 [43]，说明 P 在植物体内具有明显协同性 [44]。本研究结果发现，植物叶和根的 N、P 都与土壤的 N、P 呈显著正相关（$P < 0.05$），说明土壤 N、P 含量的高低在很大程度上决定了植物叶、根对 N、P 的吸收 [36]。此外，该研究中叶、枝、根 P 含量与凋落物 P 含量均呈极显著正相关（$P < 0.01$），这与朱德煌等 [32] 的研究结果一致，表明凋落物 P 养分来自叶、枝、根。叶、枝、根 C/P、N/P 与凋

落物P呈显著负相关（$P < 0.05$），这与黄贵等[45]的研究结果（叶片C/P与凋落物P显著正相关）不一致，反映了植物器官与凋落物营养之间的某种复杂关联性。凋落物N与土壤N、P及凋落物P与土壤C、N、P、C/P、N/P呈显著正相关（$P < 0.05$），凋落物C/N与土壤C/N呈显著正相关（$P < 0.05$），这符合土壤养分主要来源于凋落物分解的一般认知，表明植物对养分的归还受到土壤养分含量和限制元素的共同影响[7]。

整体上，叶、枝、根、凋落物、土壤的N与P呈显著正相关（$P < 0.05$），这与姜沛沛等[30]的研究结果一致，表明N、P在植物器官、凋落物、土壤这一连续体内表现出高度的一致性。另外，各组分之间P含量均为显著正相关关系，更加深入地揭示了植物养分来自土壤，植物又通过凋落物的分解将养分返还给土壤，说明植物、凋落物、土壤之间的养分是相互制约与联系的[46]。此外，植物叶C/N、C/P、N/P与土壤C/N、C/P、N/P，枝C/P、N/P与土壤C/N、C/P，根N/P与土壤C/N呈显著负相关（$P < 0.05$），表明土壤养分会对植物叶、枝、根养分产生影响；叶、枝、根C/P、N/P与凋落物P呈显著负相关（$P < 0.05$），说明叶、枝、根养分对凋落物养分产生影响[47]。总之，生态系统中营养元素（C、N、P）的循环是通过植物、凋落物、土壤之间的养分转换与运输完成，在某种程度上，这种循环反映了营养元素之间的转化和流动，揭示了群落物种适配、改造环境的策略以及植物间环境适应机制的差异[48]。

3.5 混交群落内稳性及养分再吸收率和利用率

生态化学计量内稳性是生态化学计量学的核心内容，指生物在变化的环境中仍能维持自身生理生化特征相对稳定的能力[49]。本研究中，植物不同器官的生态化学计量存在明显差异，整体表现为枝的化学计量内稳性强于叶和根，这归因于不同生长环境下植物养分在体内利用的基本权衡，而植物的体内平衡状态与植物器官的生理功能密切相关[50]。此外，叶片C，枝C、N、C/N以及根C/N的内稳性模型的结果未达到显著水平，表现为绝对稳态，说明在土壤养分发生变化时，这些指标的响应幅度较小，变化不明显。另外，叶、枝、根的P元素均表现为敏感型，意味着各器官P元素受土壤P含量的影响较大，这主要是因为植物P的获取主要通过根系吸收和利用土壤中的P，途径较为单一[20]。

养分再吸收是指植物在器官衰老和凋落之前，将自身组织中的养分转移并运输到其他组织，为新组织提供能量和养分，进而延长养分在植物体内保留的时间，从而减少植物对外部养分依赖的生理过程[51]。本研究中，各混交群落对C、N的再吸收率均表现为正值，说明在凋落前均会将C、N养分进行转移与再利用。值得注意的是，2种灌木混交群落对P的再吸收率为负值，意味着这2种混交群落在凋落前未发生P养分的转移过程，这可能与它们本身缺P有关，叶片分配的P只能供它们完成自身的生理生态需求，而2种乔木混交群落对P的再吸收率为正值，表明它们在凋落前会将P进行转移。一般来说，较高的养分利用效率表明植物可以通过较低的养分吸收和保留产生更多的生物量，这一重要策略可以让植物适应土壤中的低养分含量。本研究中，P的养分利用率显著高于N和C，这意味着在P元素匮乏的罗山混交群落中，植物通过提高对P的利用效率来确保正常的生理和生化反应[48]。

本研究对宁夏罗山典型混交群落植物的叶、枝、根等器官，以及凋落物、土壤生态化学计量特征进行研究，结果可为罗山混交群落的养分循环和元素限制性提供理论依据。需要指出的是，群落各组分的生态化学计量特征受多种环境因子的综合影响，且不同环境因子对各组分的影响强度存在显著差异。为更加系统全面地了解罗山植物群落的生态化学计量特征，在未来的研究中还需考虑微生物的参与，探讨“植物 - 凋落物 - 土壤 - 微生物”连续体的变化特征和关联，并充分考虑气候、地形、成土母质等因子的综合影响，同时要开展长期定位观测，以揭示各群落类型生态化学计量特征随季节的变化规律，为罗山生态系统的可持续性提供参考依据。

4 结 论

宁夏罗山4种混交群落中，植物叶N、P养分分配高于枝和根。乔木混交群落植物P含量高于灌木混交群落，碳磷比（C/P）、氮磷比（N/P）低于灌木混交群落。乔木混交群落土壤C、N含量及C/P、N/P均高于灌木混交群落。植物各器官、凋落物、土壤之间P含量存在显著正相关关系，可见P元素在各组分间联系紧密。叶、枝、根的P含量以及C/P、N/P均为敏感型，随土壤养分含量的变化而发生显著波动。乔木混交群落N、P的再吸收率强于灌木混交群落。各混交群落P的养分利用率高于N和C。2种灌木混交群落生长受P限制，建议加强P元素的补充以改善群落生长状况。

2 种乔木混交群落生长受 N 限制，可通过引进固氮树种以提升土壤肥力及群落生产力。各混交群落对 C、N、P 的利用率整体偏低，因此提高罗山土壤的保肥能力对其生态系统的可持续性至关重要。研究结果可为罗山混交林的合理经营及植被恢复提供理论依据。

参考文献：

[1] 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 C, YANG Z J, YANG L, 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.

[2] 张雨鉴 , 王克勤 , 宋娅丽 , 等 . 滇中亚高山森林植物叶 - 凋落叶 - 土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报 ,2020,40(21):7648-7658.
ZHANG Y J, WANG K Q, SONG Y L, et al. C, N and P stoichiometric characteristics of leaf, litter and soil for subalpine forests in central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(21):7648-7658.

[3] 萨仁其力莫格 , 荆佳强 , 秦洁 , 等 . 不同利用方式下贝加尔针茅草原植物和土壤的生态化学计量特征 [J]. 中国草地学报 , 2022,44(1):20-29.
SARENQILIMOGE, JING J Q, QIN J, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plants and soil in *Stipa baicalensis* grassland under different utilization modes[J]. Chinese Journal of Grassland,2022,44(1):20-29.

[4] 王亚军 , 郁珊珊 . 城市绿化植物 - 凋落物 - 土壤系统碳氮磷化学计量特征研究 [J]. 西北植物学报 ,2017,37(1):171-180.
WANG Y J, YU S S. Ecological stoichiometric characteristics of plants, litter and soils of urban green plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2017,37(1):171-180.

[5] CUI J B, LI Y M, ADAMOWSKI J F, et al. Response of leaf, litter, and root ecological stoichiometries to grazing exclosure duration on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2024,241:106123.

[6] 张巧颖 , 刘雪华 . 中亚热带原生性森林生态系统土壤生态化学计量学特征 : 以武夷山为例 [J]. 亚热带水土保持 , 2016,28(2):19-21, 50.
ZHANG Q Y, LIU X H. Characteristics of soil ecological stoichiometry in the middle subtropical original forest ecological system: case study in Wuyishan mountain[J]. Subtropical Soil and Water Conservation,2016,28(2):19-21,50.

[7] 刘姝萱 , 安慧 , 张馨文 , 等 . 氮磷添加对荒漠草原植物 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征的影响 [J]. 生态学报 ,2022, 42(21):8773-8783.
LIU S X, AN H, ZHANG X W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the ecological stoichiometry of plant-litter-soil in desert grassland[J]. Acta Ecologica Sinica,2022, 42(21):8773-8783.

[8] 王飞 , 白青蒙 , 曹秀文 , 等 . 甘南白龙江 3 种次生林叶片 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2023,43(12):116-125.
WANG F, BAI Q M, CAO X W, et al. Ecological stoichiometry of leaf-litter-soil continuum of three secondary forests in Bailongjiang, southern Gansu Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(12):116-125.

[9] 俞月凤 , 韦建华 , 胡钧铭 , 等 . 桂西北喀斯特地区退化群落灌草不同器官 N、P 生态化学计量内稳性特征 [J]. 生态学报 , 2024,44(12):5367-5376.
YU Y F, WEI J H, HU J M, et al. Nitrogen and phosphorus stoichiometric homoeostasis in different organs of shrubs and herbs in degraded vegetation communities in the karst area of northwestern Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(12): 5367-5376.

[10] 姜俊 , 陈长启 , 陈贝贝 , 等 . 林分密度对北京石质山地侧柏人工林碳氮磷化学计量和养分再吸收的影响 [J]. 北京林业大学学报 ,2024,46(10):33-41.
JIANG J, CHEN C Q, CHEN B B, et al. Effects of stand density on carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption of *Platycladus orientalis* plantations in rocky mountainous area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University,2024, 46(10):33-41.

[11] 李千飞 , 沈艳 , 马红彬 , 等 . 宁夏罗山山地草原植物群落数量分类与生物多样性特征 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(10):2697-2706.
LI Q F, SHEN Y, MA H B, et al. Quantitative classification and biodiversity characteristics of plant communities in Luoshan mountain steppe, Ningxia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(10):2697-2706.

[12] 漆龙 , 洪希群 , 林晗 , 等 . 闽北不同阔叶人工林叶片和土壤生态化学计量特征 [J]. 森林与环境学报 ,2025,45(3):246-253.
QI L, HONG X Q, LIN H, et al. Ecological stoichiometric characteristics of leaves and soil in different broad-leaved plantations in northern Fujian Province[J]. Journal of Forest and Environment,2025,45(3):246-253.

[13] 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.
CHEN J L, YANG H, LIU C, et al. Comprehensive evaluation of the water conservation capacity of litter and soil layers in three typical forest types in the Luoshan nature reserve, Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(19):7987-7997.

[14] 刘清 . 宁夏罗山不同森林群落功能性状和多样性的研究 [D]. 银川 : 宁夏大学 ,2024.

LIU Q. Study on functional traits and diversity of different forest communities in Luo mountain of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University,2024.

[15] 杨君珑 , 张学丽 , 曹兵 , 等 . 宁夏罗山典型植被类型的土壤活性有机碳组分研究 [J]. 西部林业科学 ,2017,46(4):61-66.
YANG J L, ZHANG X L, CAO B, et al. Active organic carbon in soil of typical vegetation in Luoshan of Ningxia[J]. Journal of West China Forestry Science,2017,46(4):61-66.

[16] 龚昕 , 霍新茹 , 李雯 , 等 . 宁夏罗山山地草原植被群落特征及其空间分异 [J]. 草业学报 ,2025,34(2):1-15.
GONG X, HUO X R, LI W, et al. Vegetation community characteristics and spatial differentiation in mountain grassland in Luoshan, Ningxia[J]. Acta Prataculturae Sinica,2025,34(2):1-15.

[17] 朱青青 , 刘超 , 沈艳 , 等 . 宁夏罗山草地生态系统服务价值的地形效应 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(12):3267-3274.
ZHU Q Q, LIU C, SHEN Y, et al. Terrain effects on the value of grassland ecosystem services in Luoshan, Ningxia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(12):3267-3274.

[18] 姜俊 , 陆元昌 , 秦永胜 , 等 . 北京平原地区不同人工林叶片 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征 [J]. 生态环境学报 ,2020,29(4):702-708.
JIANG J, LU Y C, QIN Y S, et al. Ecological stoichiometric characteristics of leaf-litter-soil for four dominant tree species in plain afforestation area, Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences,2020,29(4):702-708.

[19] 张剑 , 齐璇璇 , 刘冬 , 等 . 干旱区湿地芦苇各器官生态化学计量对土壤因子的响应 [J]. 生态学杂志 ,2021,40(3):701-711.
ZHANG J, QI X X, LIU D, et al. Stoichiometric responses of *Phragmites australis* organs to soil factors in a wetland from arid area[J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(3):701-711.

[20] 姚舒舒 , 钟全林 , 蔡世锋 , 等 . 不同林龄木荷叶片 - 细根 - 土壤碳氮磷化学计量及稳态性特征 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(3):738-746.
YAO S S, ZHONG Q L, CAI S F, et al. C∶N∶P stoichiometry and homeostasis in leaf, fine root, and soil of *Schima superba* under different stand ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2025,36(3):738-746.

[21] AERTS R, CHAPIN F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. Advances in Ecological Research,2000,30:1-67.

[22] 温晨 . 半干旱黄土小流域不同植被类型下植物 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征研究 [D]. 临汾 : 山西师范大学 ,2021.
WEN C. Ecological stoichiometry characteristics of plant-litter-soil under different vegetation types in the semi-arid loess small watershed[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2021.

[23] 拉本 , 盛洲 , 周华坤 , 等 . 可鲁克湖—托素湖保护区 4 种盐生植物生态化学计量特征 [J]. 草地学报 ,2023,31(2):518-527.
LA B, SHENG Z, ZHOU H K, et al. Ecological stoichiometric characteristics of four species of halophytes in Keluke lake-Tuosu lake reserve[J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(2):518-527.

[24] 董雪 , 海鹭 , 韩春霞 , 等 . 干旱区降雨梯度对沙冬青根 - 茎 - 叶生态化学计量特征的影响 [J]. 林业科学研究 ,2023,36(5):60-71.
DONG X, HAI L, HAN C X, et al. Effects of precipitation gradient on ecological stoichiometric characteristics in root-stem-leaf of *Ammopiptanthus mongolicus* in arid region[J]. Forest Research,2023,36(5):60-71.

[25] 王凯 , 齐悦彤 , 那恩航 , 等 . 基于器官 - 凋落叶 - 土壤生态化学计量特征的樟子松和赤松人工林养分利用策略 [J]. 生态学杂志 ,2023, 42(2):274-281.
WANG K, QI Y T, NA E H, et al. Nutrient use strategies of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus densiflora* plantations based on ecological stoichiometry in organ-litter-soil systems[J]. Chinese Journal of Ecology,2023,42(2):274-281.

[26] DING D D, LIU M H, ARIF M, et al. Responses of ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus to periodic submergence in mega-reservoir: growth of *Taxodium distichum* and *Taxodium ascendens*[J]. Plants,2021,10:2040.

[27] HE M Z, SONG X, TIAN F P, et al. Divergent variations in concentrations of chemical elements among shrub organs in a temperate desert[J]. Scientific Reports,2016,6:20124.

[28] ZHANG J H, LI M X, XU L, et al. C ∶ N ∶ P stoichiometry in terrestrial ecosystems in China[J]. Science of the Total Environment, 2021,795:148849.

[29] 阮长明 , 唐国勇 , 孙永玉 , 等 . 金沙江干热河谷不同植被类型植物叶片碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023, 43(9):97-104.
RUAN C M, TANG G Y, SUN Y Y, et al. Ecological stoichiometry of leaf C, N and P of different vegetation types in the dry-hot valley of the Jinsha river[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(9):97-104.

[30] 姜沛沛 , 曹扬 , 陈云明 . 陕西省森林群落乔灌草叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报 ,2016,27(2):365-372.
JIANG P P, CAO Y, CHEN Y M. C, N, P stoichiometric characteristics of tree, shrub, herb leaves and litter in forest community of Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(2):365-372.

[31] ZHU D H, ZHOU Y, PENG S H, et al. Impacts of altitude on plant green leaf, fresh litter, and soil stoichiometry in subtropical forests[J]. Frontiers in Forests and Global Change,2024,7:1331623.

[32] 朱德煌 , 曹歆雨 , 杜自强 . 武夷岩茶 “ 叶片 - 凋落物 - 土壤 ” 的生态化学计量特征 [J]. 亚热带农业研究 ,2022,18(4):259-266.
ZHU D H, CAO X Y, DU Z Q. Ecological stoichiometric characteristics of leaf-litter-soil for Wuyi rock tea[J]. Subtropical Agriculture Research,2022,18(4):259-266.

[33] WÖHL L, RUF T, EMMERLING C, et al. Assessment of

earthworm services on litter mineralisation and nutrient release in annual and perennial energy crops (*Zea mays* vs. *Silphium perfoliatum*)[J]. Agriculture,2023,13:494.

[34] BAO B H, HUANG X L, XU H D, et al. Patterns and driving mechanism of C, N, P ecological stoichiometry in plant-litter-soil systems of monoculture and mixed coastal forests in southern Zhejiang Province of China[J]. Forests,2023,14:1306.

[35] GÜSEWELL S, VERHOEVEN J T A. Litter N∶P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter[J]. Plant Soil,2006,287:131-143.

[36] 罗艳 , 贡璐 , 朱美玲 , 等 . 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报 ,2017,37(24):8326-8335.
LUO Y, GONG L, ZHU M L, et al. Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim river desert[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8326-8335.

[37] 肖思颖 , 付芳伟 , 李江荣 , 等 . 色季拉山 6 种典型林型土壤生态化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(11):120-130,172.
XIAO S Y, FU F W, LI J R, et al. Soil ecological stoichiometry characteristics of six typical forest types in the Sejila mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(11):120-130,172.

[38] SONG S Z, XIONG K N, CHI Y K. Ecological stoichiometric characteristics of plant-soil-microorganism of grassland ecosystems under different restoration modes in the karst desertification area[J]. Agronomy,2023,13:2016.

[39] CHEN Z X, XU X, WEN Y L, et al. The critical role of soil ecological stoichiometric ratios: how does reforestation improve soil nitrogen and phosphorus availability?[J]. Plants,2024,13:2320.

[40] LUO W M, WU X L, CHEN S, et al. Soil-microbial CNP content and ecological stoichiometry characteristics of typical broad-leaved tree communities in Fanjing mountain in spring[J]. Diversity,2024,16:249.

[41] WU G L, GAO J, LI H L, et al. Shifts in plant and soil C, N, and P concentrations and C∶N∶P stoichiometry associated with environmental factors in alpine marshy wetlands in west China[J]. Catena,2023,221:106801.

[42] 赵维俊 , 刘贤德 , 金铭 , 等 . 祁连山青海云杉林叶片 - 枯落物 - 土壤的碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 土壤学报 ,2016,53(2):477-489.
ZHAO W J, LIU X D, JIN M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian mountains[J]. Acta Pedologica Sinica,2016,53(2):477-489.

[43] FENG W L, YANG J L, XU L G, et al. The spatial variations and driving factors of C, N, P stoichiometric characteristics of plant and soil in the terrestrial ecosystem[J]. Science of the Total Environment,2024,951:175543.

[44] 过怡婷 , 张思盈 , 刘颖 , 等 . 蒋家沟干热河谷区灌草层植被与土壤的养分分布及生态化学计量特征 [J]. 山地学报 ,2023,41(6):824-835.
GUO Y T, ZHANG S Y, LIU Y, et al. Nutrient distribution and ecological stoichiometry characteristics of shrub-grass layer vegetation and soil in the Jiangjia gully, China[J]. Mountain Research,2023,41(6):824-835.

[45] 黄贵 , 余林兰 , 刘昕宇 , 等 . 天坑森林植物叶 - 凋落物 - 土壤 C、N、P 生态化学计量特征 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2024,32(3):367-377.
HUANG G, YU L L, LIU X Y, et al. Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of leaf, litter and soil in the karst Tiankeng forest[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2024,32(3):367-377.

[46] 聂明鹤 , 沈艳 , 陆颖 , 等 . 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片 - 土壤生态化学计量特征 [J]. 草地学报 ,2021,29(1):131-140.
NIE M H, SHEN Y, LU Y, et al. Ecostoichiometric characteristics of dominant plant leaves-soil ecology in different communities of desert steppe in Yanchi County, Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(1):131-140.

[47] 刘娜 , 喻理飞 , 赵庆 , 等 . 喀斯特高原石漠化区次生林叶片 - 枯落物 - 土壤连续体碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 应用与环境生物学报 , 2020,26(3):681-688.
LIU N, YU L F, ZHAO Q, et al. C∶N∶P stoichiometry of leaf-litter-soil continuum in secondary forests of the rocky desertification regions of the karst plateau[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2020,26(3):681-688.

[48] WU P, ZHOU H, CUI Y C, et al. Stoichiometric characteristics of leaf, litter and soil during vegetation succession in Maolan national nature reserve, Guizhou, China[J]. Sustainability,2022,14:16517.

[49] 淑敏 , 同拉嘎 , 红艳 , 等 . 生物炭改良的风沙地植物 - 土壤 - 微生物生态化学计量特征及其内稳性 [J]. 干旱区研究 ,2025,42(4):718-729.
SHU M, TONG L G, HONG Y, et al. Ecostoichiometric characteristics and homeostasis of the plant-soil-microbial ecosystem in eolian sandy land amended with biochar[J]. Arid Zone Research,2025,42(4):718-729.

[50] ZHANG H, LI X, WANG S Q, et al. Tree-litter-soil system C∶N∶P stoichiometry and tree organ homeostasis in mixed and pure Chinese fir stands in south subtropical China[J]. Frontiers in Forests and Global Change,2024,7:1293439.

[51] SONG D, LIU S T, FAN L D, et al. Nutrient stoichiometric and resorption characteristics of the petals of four common urban greening Rosaceae tree species[J]. Frontiers in Plant Science, 2023,14:1201759.

[本文编校：谢荣秀]