

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.027; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.027.

裴群策, 邓磊, 袁凯璇, 等. 祁连山青海云杉-白桦混交林土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):155-164.

Chang Qunce, Deng Lei, Yuan Kaixuan, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics of *Picea crassifolia*-*Betula platyphylla* mixed forests in Qilian Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):155-164.

祁连山青海云杉-白桦混交林土壤生态化学计量特征

裴群策^{1,2,3}, 邓磊^{2,4}, 袁凯璇⁵, 徐仁飞¹,
王璐¹, 陈哲^{1,2,3}, 王文颖^{1,2,3}, 关晋宏^{1,2,3}

(1. 青海师范大学 生命科学院 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008;

2. 青海省青藏高原生物多样性形成机制与综合利用重点实验室, 西宁 810008;

3. 青海省人民政府-北京师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008;

4. 广东海洋大学 滨海农业学院, 广东 湛江 524088; 5. 西宁市大通回族土族自治县林业站, 西宁 810199)

摘要: [目的] 探讨不同混交比例针阔混交林不同土层土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)含量及其化学计量比的变化特征, 为揭示土壤养分循环及深入理解祁连山天然次生林的生态功能维持机制提供直接依据。[方法] 以祁连山东部青海云杉(*Picea crassifolia*)和白桦(*Betula platyphylla*)混交林为对象, 设置4种混交林型: 云杉3白桦7(P3B7)、云杉4白桦6(P4B6)、云杉6白桦4(P6B4)和云杉8白桦2(P8B2), 并以白桦纯林(B10)和青海云杉纯林(P10)作为对照, 研究土壤C、N、P及其化学计量比特征。[结果] (1) 祁连山东部青海云杉-白桦混交林土壤SOC、TN和C:N:P比值皆高于全国森林土壤, 表现为高碳高氮分布特征, 该地区森林植被生长受到磷限制;(2) 混交林型中, 随着青海云杉占比的增加, 土壤SOC和TN含量先增加再减少, 并分别在P6B4与P8B2林型中含量最高;(3) 土壤SOC、TN和C:N:P比值受土层深度的影响大于混交林型及二者交互作用的影响。土壤SOC、TN、C:P和N:P随土层深度加深逐渐减小, 土壤C:N随土层深度逐渐增大。(4) 主成分分析和拟合分析表明土壤C、N、P与其化学计量比密切相关, 碳氮耦合连同土壤磷的有效性与土壤水分协同调控土壤化学计量平衡。[结论] 混交林有利于提升土壤C、N含量, 改善土壤理化性质, C、N、P耦合受土壤磷有效性调控。

关键词: 针阔混交; 混交比例; 土壤碳氮磷; 化学计量比; 养分限制

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0155-10

Soil ecological stoichiometric characteristics of *Picea crassifolia*-*Betula platyphylla* mixed forests in Qilian Mountains

Chang Qunce^{1,2,3}, Deng Lei^{2,4}, Yuan Kaixuan⁵, Xu Renfei¹, Wang Lu¹,
Chen Zhe^{1,2,3}, Wang Wenyong^{1,2,3}, Guan Jinhong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Laboratory of Biodiversity Formation Mechanism and Comprehensive Utilization of the Qinghai-Xizang Plateau in Qinghai Province, Xining 810008, China;

3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, China; 4. College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 5. Forestry Station, Datong Hui and Tu Autonomous County, Xining 810199, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the variations in soil organic carbon (C), total nitrogen (N), and total phosphorus (P) contents, and their stoichiometric ratios across different soil layers in coniferous-broadleaf mixed forests with varying mixed ratio. The findings provide a direct basis for revealing soil nutrient cycling and for

收稿日期: 2025-04-04

修回日期: 2025-05-12

接受日期: 2025-05-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42267072); 青海省科技厅自然科学基金青年项目(2022-ZJ-963Q)

第一作者: 裴群策(2000—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为陆地生态系统碳循环研究。E-mail: quncec@163.com

通信作者: 关晋宏(1984—), 女, 山西宁武人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植被恢复与碳汇效应研究。E-mail: cocogjh@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

deepening the understanding of the mechanisms maintaining the ecological functions of natural secondary forests in the Qilian Mountains. [Methods] Mixed forests of *Picea crassifolia* and *Betula platyphylla* in the eastern Qilian Mountains were selected as the study object. Four mixing forest types were established: P3B7 (30% *P. crassifolia*, 70% *B. platyphylla*), P4B6 (40% *P. crassifolia*, 60% *B. platyphylla*), P6B4 (60% *P. crassifolia*, 40% *B. platyphylla*), and P8B2 (80% *P. crassifolia*, 20% *B. platyphylla*). Pure forests of *B. platyphylla* (B10) and *P. crassifolia* (P10) were used as controls. Soil C, N, P and their stoichiometric characteristics were analyzed. [Results] (1) In the eastern Qilian Mountains, the SOC, TN, and C:N:P ratios of the *P. crassifolia* and *B. platyphylla* mixed forest soils were all higher than those of national forest soils in China, exhibiting characteristics of high carbon and high nitrogen patterns. Forest vegetation growth in this region was limited by phosphorus. (2) In the mixed forests, as the proportion of *P. crassifolia* increased, SOC and TN contents first increased and then decreased, with the highest values observed in the P6B4 and P8B2 forest types. (3) The influence of soil depth on SOC, TN and C:N:P ratios was greater than that of mixing pattern or their interaction. Specifically, the SOC, TN, C:P and N:P ratios decreased gradually with increasing soil depth, while the soil C:N ratio gradually increased. (4) Principal component analysis and regression analysis showed that soil C, N and P were closely related to their stoichiometric ratios. The coupling of carbon and nitrogen, along with soil phosphorus availability and soil moisture, jointly regulated the soil stoichiometric balance. [Conclusion] Mixed forests are beneficial for enhancing soil C and N contents, improving soil physicochemical properties, and facilitating the coupling of C, N and P, which is regulated by soil phosphorus availability.

Keywords: coniferous-broadleaved mixed forest; mixing ratio; soil carbon, nitrogen and phosphorus; stoichiometric ratio; nutrient limitation

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)作为陆地生态系统物质循环的核心,其化学计量特征深刻影响着森林生产力的形成与生态功能的维持^[1]。森林生态系统作为陆地生态系统最大的碳库和生物多样性载体^[2],C-N-P耦合关系不仅调控森林生态系统初级生产力、有机质分解及微生物代谢等核心生态过程^[3],更是表征土壤养分有效性及系统稳定性的关键生物地球化学指标^[4]。具体而言,C:N反映土壤有机质稳定性与氮素转化效率,C:P指示碳同化与磷消耗的权衡关系,进而反映土壤磷的有效性,而N:P直接表征土壤氮和磷对植被生长的养分限制状况^[5-6]。因此,对土壤C、N、P及其多维化学计量关系的研究为解析森林生态系统土壤养分循环过程提供了定量依据,对揭示植被养分的利用效率及元素的循环和平衡机制有重要意义。

混交林通过树种功能互补显著提升土壤C、N、P储量并优化其化学计量平衡而受到广泛关注^[7]。研究表明,树种混交比例对土壤化学计量特征的影响受水热条件、树种组成、混交比例及土壤类型等的显著影响^[8-9]。而混交比例作为混交林研究中可调控的关键变量,对土壤养分的作用强度呈现显著的时空异质性。在亚热带高原季风气候区,滇中玉白顶自然保护区的云南松-阔叶混交林中,土壤有机质(Soil

Organic Matter, SOM)、全氮(Total Nitrogen, TN)和全磷(Total Phosphorus, TP)含量随阔叶树种占比增加呈显著上升趋势^[10];在温带大陆性季风气候区,东北东部的针阔混交林土壤C、N含量在有机质层显著低于落叶阔叶林,但在腐殖质和淀积层显著高于落叶阔叶林^[11];在高原大陆性气候区,对5种青杆混交林土壤化学计量特征研究表明,混交林的C、N含量显著高于青杆纯林和青杆针叶混交林^[12]。这些研究表明,混交比例通过改变冠层结构调控林分内的温度、湿度、光辐射等,进而影响枯落物的输入与分解,驱动土壤酶活性及微生物代谢过程,最终塑造土壤养分空间格局。因此,阐明不同混交比例森林土壤化学计量平衡特征,对揭示冠层结构—枯落物输入—微生物代谢级联效应具有重要意义。

祁连山作为西北干旱区核心生态屏障,区域森林生态系统功能与其植被配置模式密切相关^[13]。青海云杉(*Picea crassifolia*)是该地区地带性植被建群种,多形成纯林或与白桦(*Betula platyphylla*)混交的天然次生林,在区域水源涵养、生物多样性维持和碳增汇等方面发挥着重要作用^[14-15]。尽管已有研究明确了青海云杉纯林在不同海拔梯度土壤化学计量特征^[16-17],但针对与白桦混交林土壤化学计量特征研究较少,限制了对区域混交林土壤养分循环机理的深

人认识。因此,本研究以祁连山东部东峡林场不同混交比例青海云杉-白桦混交林研究对象,分析0—100 cm土层土壤化学计量垂直分布特征及其影响因素,旨在阐明区域混交林土壤养分循环及其限制性因素,从而为深入理解祁连山天然次生林的生态功能维持机制提供直接依据。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市大通县东峡林场(101°29'09"—101°29'47" E, 37°00'23"—37°01'29" N,海拔2 980 m),林区地处祁连山脉东端大板山山麓,属青藏高原与黄土高原过渡区,年平均气温2.9℃,低温持续时间较长,最暖月气温16℃,最冷月气温-12℃,年降水量450~820 mm,60%降雨以上集中在7—9月,年蒸发量约1 100 mm,年均日照时数1 893 h。区域内分布的主要林型有青海云杉和白桦天然次生林以及二者形成的混交林,灌木优势种有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、银露梅(*Potentilla glabra*)、

陇塞忍冬(*Lonicera tangutica*)等,草本优势种有苔草(*Carex* spp.)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、藓生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)和珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等。林下土壤类型以山地灰褐土和褐色针叶林土为主。

1.2 样地设置

于2022年8月在研究区进行野外调查,充分考虑群落组成、生境条件和人为破坏等因子的代表性,以青海云杉为扩展种群,白桦则表现为退出种群,设置调查样地。根据青海云杉活力木的胸高断面积占林分总胸高断面积的比例,设置4种混交林:青海云杉3白桦7(P3B7)、青海云杉4白桦6(P4B6)、青海云杉6白桦4(P6B4)、青海云杉8白桦2(P8B2),以及白桦纯林(B10)和青海云杉纯林(P10)作为对照,每种混交比例各设3块样地,共设置18块样地,样地面积均为20 m×20 m,样地间直线距离不小于100 m。记录各样地的经纬度、海拔、坡度和郁闭度等,样地基本信息详见表1。

表1 样地基本信息
Table 1 Basic information of sample plots

混交林	海拔/ m	坡度/ (°)	郁闭度/ %	林分密度/ (t·hm ⁻²)	平均胸径 /cm	平均树高 /m	胸高断面积/ cm ²	0~100cm活细 根生物量/ (g·m ⁻²)
B10	2888	23	70	850±166b	22.46±0.53a	12.88±0.86ab	415.33±15.16ab	561.18±47.66a
P3B7	2840	26	74	1267±93a	17.15±0.85b	9.62±0.62b	289.85±10.56b	560.22±61.48a
P4B6	2837	23	77	942±129ab	22.16±2.28ab	11.51±0.81ab	475.51±90.06a	639.25±41.58a
P6B4	2817	22	73	858±102b	23.68±2.15a	15.42±2.10a	522.54±74.86a	652.82±34.23a
P8B2	2900	25	78	817±104b	22.51±1.08a	14.06±1.27ab	506.47±35.18a	546.99±24.65a
P10	2910	11	75	950±14ab	22.27±2.27ab	13.33±2.33ab	527.93±63.09a	351.24±86.44b

注:数值表示为平均值±标准误,同列不同字母表示同一指标不同混交林型间差异显著($p < 0.05$)。

1.3 样品采集及理化性质测定

土壤样品采集:取样前先将土壤表面的枯落物清理干净,在样地内分坡上、坡中、坡下用内径6 cm的土钻分8个土层(0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—80, 80—100 cm)采集土壤样品。每个坡位采集3钻土,共计9钻,每层土按照等质量比混合作为一个土壤样品。将土壤样品带回实验室并经自然风干后去除动植物残体、石砾、植物根系等杂物,研磨过100目筛后,用于土壤C、N、P含量的测定。

土壤容重样品取样:在调查样地内或样地旁边选择未受人为干扰、植被结构和土壤具代表性的地段挖掘土壤剖面,深至100 cm,不够100 cm至基岩为止。采用体积为100 cm³的环刀在野外取样,称其鲜重带回实验室105℃烘干至恒重,计算其土壤质量含水量(Soil Water Content, SWC)和土壤容重(Bulk

Density, BD)。

细根样品采集:在样地9个土壤采样点附近,按照土壤采样同等深度,采用内径为9 cm的根钻采集细根,共计1 296个根系样品。取好的样品装入自封袋,记录不同混交林型、样地、土层深度和重复的标记。在野外寻找就近河边流动水清洗根系,拣出直径≤2 mm的细根,根据根系的外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度区分死根和活根,将各根系样品带回实验室在105℃烘箱中烘干至恒重,用电子天平称重(精确到0.000 1 g),换算出单位面积细根现存量(FRB),装袋待测分析其碳含量。

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)和全氮(TN)含量采用元素分析仪(Elementar Vario ISOTOPE cube, Germany)测定,土壤全磷(TP)含量在研磨后的土壤样品经硫酸-高氯酸消煮法处理后,使用

AA3流动注射分析仪进行测定,土壤pH采用pH仪进行测定。

1.4 数据处理

对数据进行统计分析前先进行正态性检验,对土壤SOC, TN和TP的数据进行 $\lg(x+1)$ 转换,以改善正态分布和减少异方差性。使用SPSS 26对数据进行统计分析和检验,使用单因素方差分析(One-Way ANOVA)分析不同混交林型及不同土层深度各指标的差异显著性,运用双因素方差分析(Two-Way ANOVA)分析混交林型、土层深度以及其交互作用对土壤生态化学计量特征的影响,并用最小显著性差异法(Least-Significant Difference, LSD)进行多重比较。使用Origin pro 2021进行土壤C、N、P及其化学计量比之间的拟合分析和主成分分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同混交林型土壤C、N、P含量的描述性统计分析

不同混交比例青海云杉和白桦混交林土壤

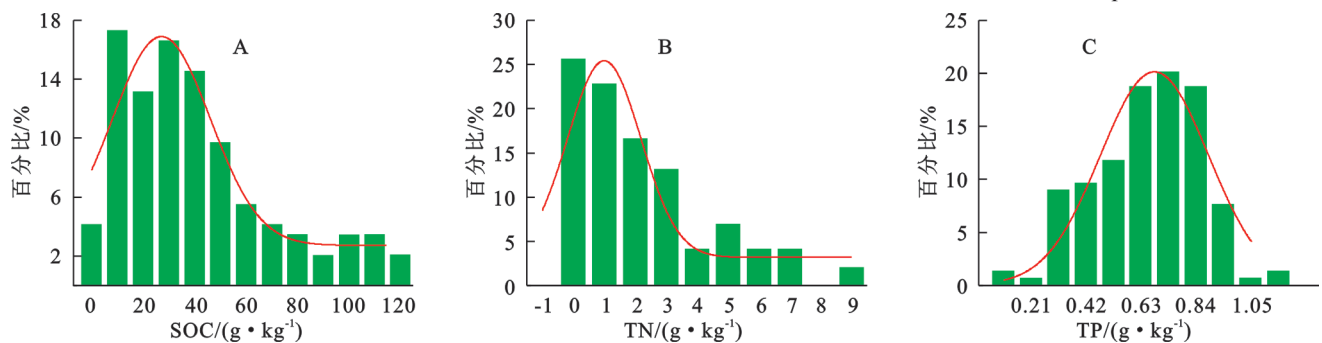


图1 不同混交林型土壤SOC, TN, TP含量频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of soil SOC, TN, and TP contents under different mixed forest types

不同林型0—100 cm土层土壤TN含量变化范围为0.07~9.64 g/kg。同一土层的土壤TN含量变化趋势与土壤SOC变化一致。其中,P6B4的土壤平均TN含量最高,为(3.30±0.59) g/kg,相较于白桦纯林和青海云杉纯林分别增加27.60%和10.77%。同一林型土壤TN含量随土层深度的增加而显著降低($p<0.05$),6种林型0—20 cm的土壤平均TN含量是20—100 cm土壤平均含量的2.14~4.80倍。土壤TN含量在6种林型之间以及不同土层间存在显著差异($p<0.01$)(表2)。

不同林型0—100 cm土层土壤TP含量变化范围为0.15~1.19 g/kg。在0—50 cm土层中,土壤TP含量在林型之间差异不显著($p>0.05$),在50—100 cm土层中,土壤TP含量在不同林型间存在显著差异($p<0.05$)。同一林型的土壤TP含量随土层深度的增加变化较小,土层对土壤TP含量的影响不显著($p>0.05$),P10的土壤平均TP含量最高,为(0.80±0.03) g/kg。混交比例显著影响土壤TP含量($p<0.05$)(表2)。

SOC、TN和TP含量的均值为45.87,2.71,0.67 g/kg(图1)。土壤SOC和TN变异系数分别为67.46%和88.48%,属于高变异,土壤TP变异系数最小,为29.61%,属于中等变异。土壤SOC和TN的平均值大于中位数,呈现出明显的正偏态,土壤TP的平均值小于中位数,偏度为-0.242,表现为负偏态分布。

2.2 不同混交林型土壤C、N、P含量特征

由图2可知,不同林型0—100 cm土层土壤SOC含量变化范围为7.46~126.80 g C/kg。同一土层的土壤SOC含量随着青海云杉占比从白桦纯林(B10)增加至P3B7,SOC含量呈现下降趋势;当混交比例从P3B7增加至青海云杉纯林(P10),表现为先增加后减少的趋势。其中,P8B2的土壤平均SOC含量最高,为(53.88±6.33) g C/kg,相较于白桦纯林和青海云杉纯林分别增加22.23%和7.49%。同一林型土壤SOC含量随土层深度的增加而显著降低($p<0.05$),6种林型表层土壤(0—20 cm)SOC含量显著高于深层(20—100 cm),高出2.20~3.55倍。土壤SOC含量在6种混交林型间以及土层间存在显著差异($p<0.01$)(表2)。

2.3 不同混交林型土壤化学计量比特征

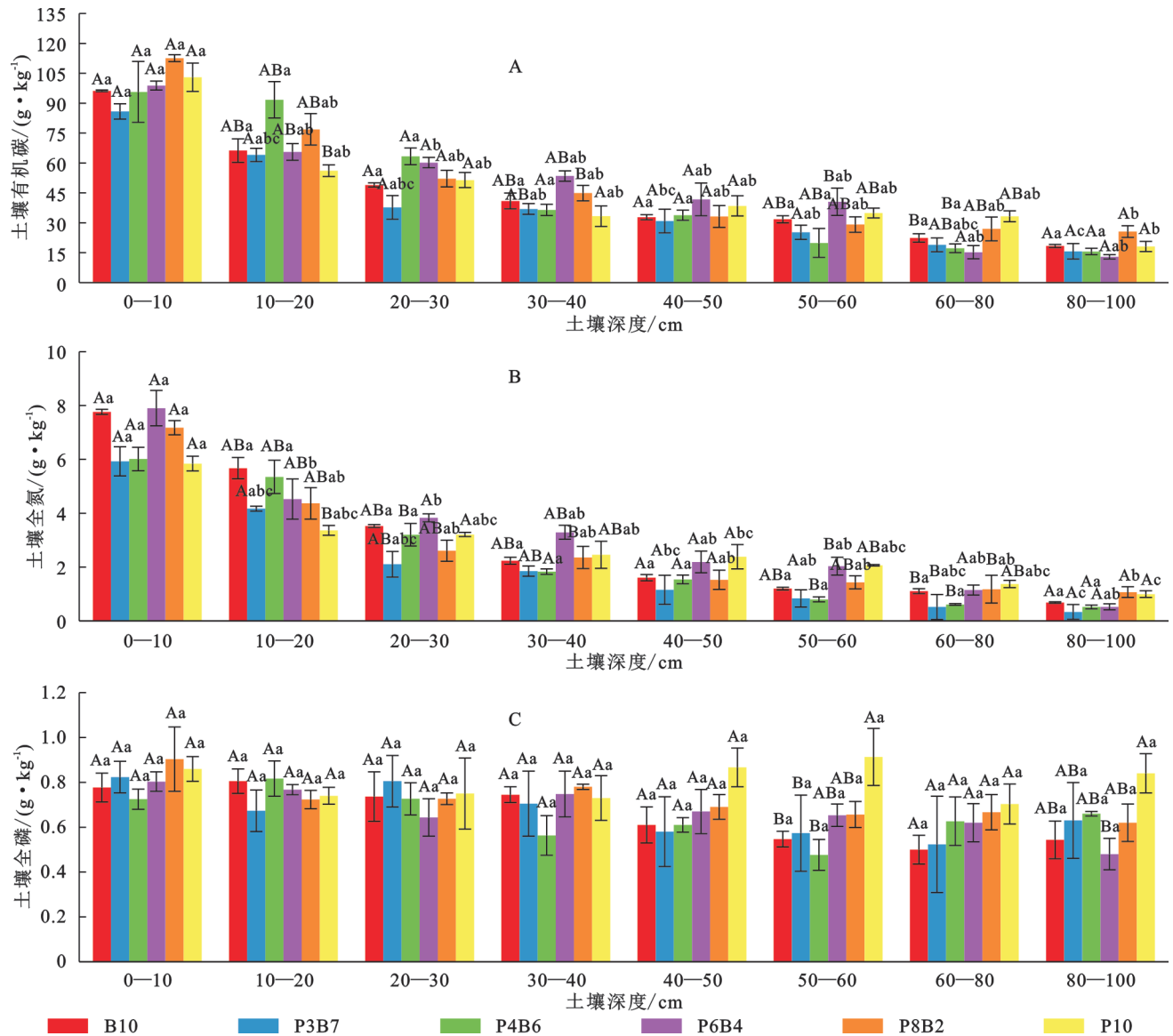
青海云杉和白桦6种混交林型0—100 cm土层土壤的C:N、C:P和N:P变化范围分别为12.78~39.77,10.51~163.54,0.15~11.86,P4B6的土壤平均C:N为最高(21.73),P8B2的土壤C:P和N:P最高,分别为76.61,4.20(图3)。各林型土壤C:N、C:P和N:P均随土层深度的加深而增加而显著减少($p<0.05$)。除P8B2和P10外,土壤C:N在其他林型各土层间存在显著差异($p<0.05$),混交林土壤C:N相对青海云杉纯林增加11.91%~22.92%,相对白桦纯林减少7.30%~14.71%。各个林型的土壤C:P和N:P在30—50 cm土层中存在显著差异($p<0.05$)。混交林土壤的平均C:P相比青海云杉纯林增加6.59%~34.38%,6种林型0—20 cm的土壤平均N:P是其20—100 cm土壤的2.62~3.78倍。双因素方差分析表明,土壤C:N、C:P和N:P在不同土层间存在极显著差异($p<0.01$),在6种混交林型及土层与林型交互

用整体无显著差异($p>0.05$)(表 2)。

2.4 土壤化学计量特征与影响因子相关性

对 6 种林型土壤生态化学计量特征及土壤因子进行主成分分析(图 4), 结果表明, PC1 和 PC2 的贡献率分别为 54.9% 和 13.0%, 累计方差贡献率达到 67.9%, 可以使用 PC1 和 PC2 来解释土壤化学计量特征的变异信息。在第一主成分上, SOC、TN、N:P、FRB 和 BD 有较高的正载荷, 相关系数分别为 0.412, 0.411, 0.391, 0.378

和 -0.355; 第二主成分上, TP、C:P、SWC、N:P 和 C:N 有较高的正载荷, 相关系数分别为 0.752, -0.396, 0.303, -0.294 和 -0.260。土壤 SOC、TN、FRB、N:P、C:P 和 SWC 之间呈显著正相关($p<0.05$), 并与土壤 BD、pH 和 C:N 呈显著负相关($p<0.05$), 土壤 BD、pH 和 C:N 之间呈显著正相关($p<0.05$), 土壤 TP、SWC 和 SOC 呈显著正相关($p<0.05$)(图 5)。C:P 和 N:P 对 PC1 和 PC2 皆有较好的协同性。



注: 不同大写字母表示相同土层不同混交林型间差异显著, 不同小写字母表示相同混交林型不同土层间差异显著($p<0.05$)。图中数据为平均值土标准差($n=3$), 下同。

图 2 不同混交林型 0—100 cm 土层土壤 SOC, TN, TP 含量垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of soil SOC, TN, and TP contents across 0—100 cm soil depth under different mixed forest types

3 讨论

3.1 混交比例对针阔林土壤 C、N、P 含量的影响

土壤 C、N、P 含量是衡量土壤肥力的关键指标, 直接影响森林生态系统的生产力与养分循环^[2]。本研究青海云杉和白桦 6 种混交林型土壤的 SOC、TN、TP

平均含量分别为 45.87, 2.718, 0.67 g/kg, 与全国森林土壤平均水平(11.2, 1.06, 0.65 g/kg)^[18]相比, 研究区土壤 SOC 和 TN 含量高出 309.6% 和 156.4%, 而 TP 含量与之相近, 表明祁连山东部森林土壤呈高碳高氮特征。然而, 与祁连山冰沟河流域上游林地土壤 SOC、TN、TP(62.29, 4.68, 0.70 g/kg)^[19]相比, 本研究

土壤 SOC 和 TN 含量分别降低了 26.36% 和 41.92%，TP 含量则基本一致，这一差异可能是海拔梯度驱动的环境因子变化有关。研究区海拔低于冰沟河流域

上游(海拔 3 081 m)，较高的温度与微生物活性可能加速了植物残体分解和有机质矿化，导致土壤 SOC 和 TN 的净积累量减少。

表 2 不同混交林型土壤化学计量特征及相关因子的双因素方差分析
Table 2 Two-way ANOVA of soil stoichiometric characteristics and related factors under different mixed forest types

自变量	自由度	BD	SWC	pH	SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
土层深度	5	5.24**	1.24	0.89	5.16**	2.98*	2.99*	2.27	1.64	1.85
混交林型	7	48.71**	2.84*	2.00	86.85**	83.25**	1.94	5.54**	25.78**	35.53**
土层深度×混交林型	35	0.54	0.29	0.60	0.70	0.80	0.62	0.60	1.26	0.83

注：*表示 $p < 0.05$ ；**表示 $p < 0.01$ 。

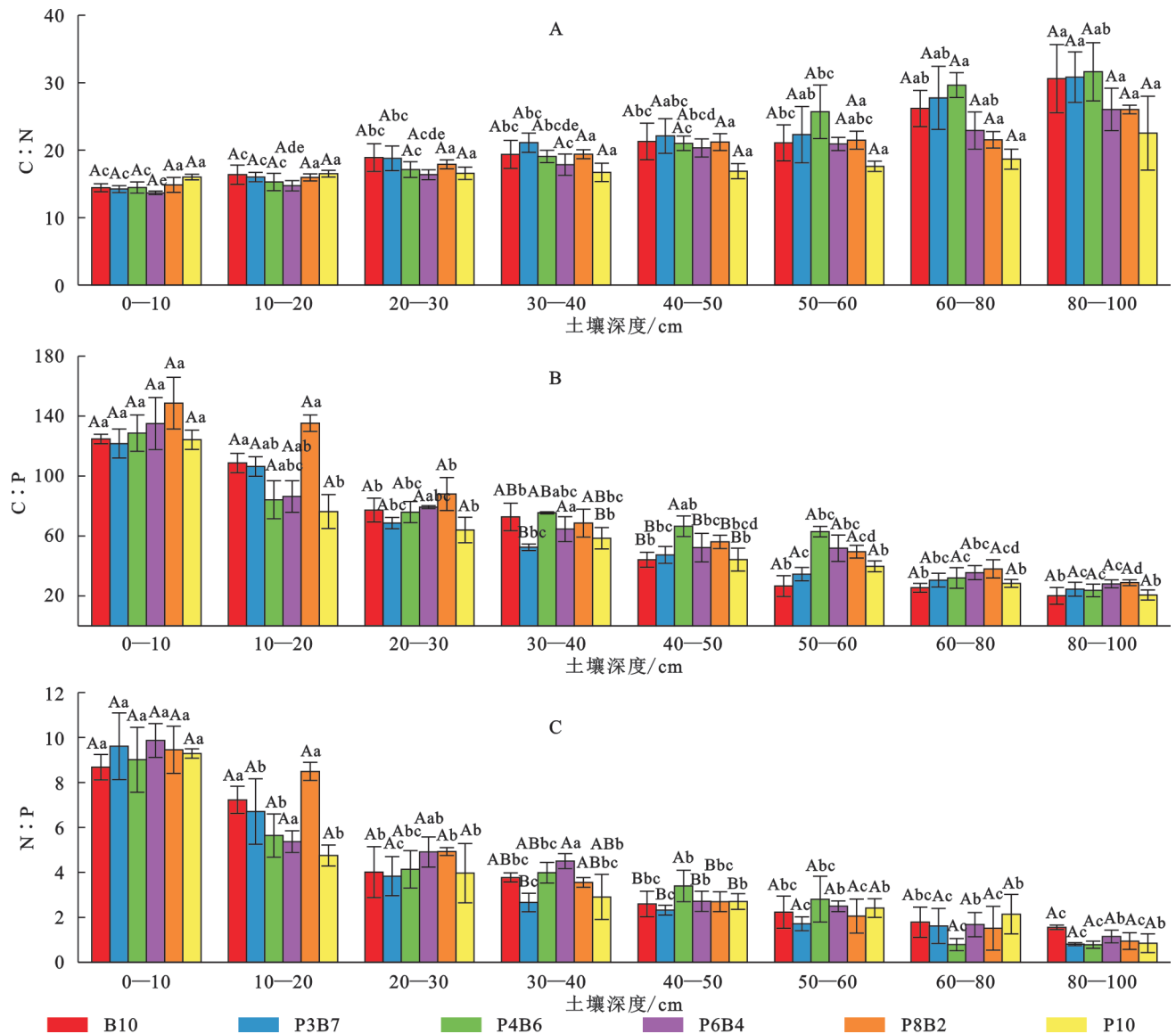


图 3 不同混交林型 0—100 cm 土层土壤 C:N, C:P, N:P 化学计量含量垂直分布特征
Fig. 3 Vertical distribution of soil C:N, C:P, and N:P stoichiometric ratios across 0—100 cm soil depth under different mixed forest types

土壤 SOC、TN 和 TP 含量在不同林型中存在显著差异，土壤 SOC 和 TN 含量在混交林中显著高于纯林，这与多数研究结果一致^[20-21]。当青海云杉占比从 B10 增加到 P3B7 时，土壤 SOC 和 TN 含量呈现下

降趋势。这可能是因为枯落物作为土壤 SOC 和 TN 的主要来源之一，其类型、积累量和分解速率显著影响土壤 C、N 含量^[22]，而白桦作为阔叶树种，其枯落物更易被微生物分解利用^[11]，从而向土壤输入更多的

SOC 和 TN。因此,随着青海云杉占比的增加,混交林中的阔叶枯落物输入量减少,导致土壤 SOC 和 TN 含量降低。然而,随着青海云杉占比从 P3B7 增加至 P10,土壤 SOC 和 TN 含量呈现先增加后减少的趋势,可能是针阔混交产生和积累了更多的地表枯落物^[10],同时,青海云杉和白桦混交能提高土壤微生物群落的稳定性^[14]。另一方面,青海云杉和白桦混交林显著提高植被细根的生物量、根长密度和比表面积等形态指标^[15],更高细根生物量的分解促进土壤碳氮的增加。因此,在枯落物、土壤微生物和植物根系的综合作用下,青海云杉和白桦混交林的土壤 SOC 和 TN 含量显著高于青海云杉纯林。6 种混交林型的土壤 TP 含量仅在 50—100 cm 土层间存在显著差异,这种垂直分布特征可能与磷元素的迁移特性和根系分布有关。磷元素易随降雨淋溶从表层向深层土壤迁移^[23],而根系的吸收和拦截会影响磷元素在深层土壤的分布。考虑到青海云杉-白桦混交林的细根主要分布在 0—40

cm^[14-15],这导致深层土壤的磷截留效率存在差异,从而在 50—100 cm 土层形成 TP 含量的显著变化。

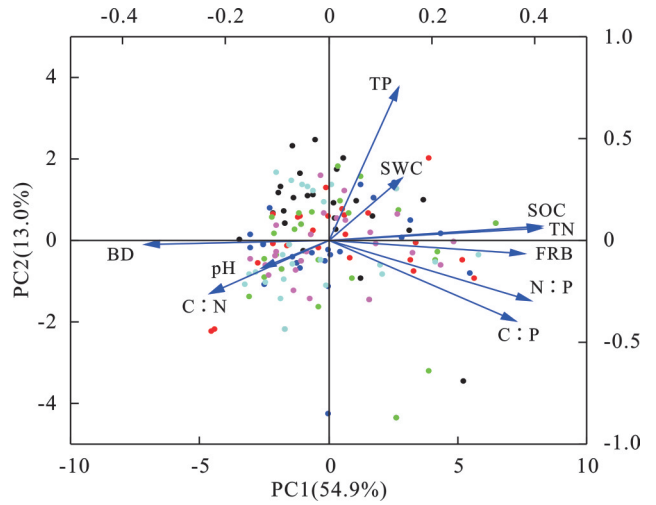


图 4 土壤化学计量特征及相关因子主成分分析
Fig. 4 Principal component analysis of soil stoichiometric characteristics and related factors

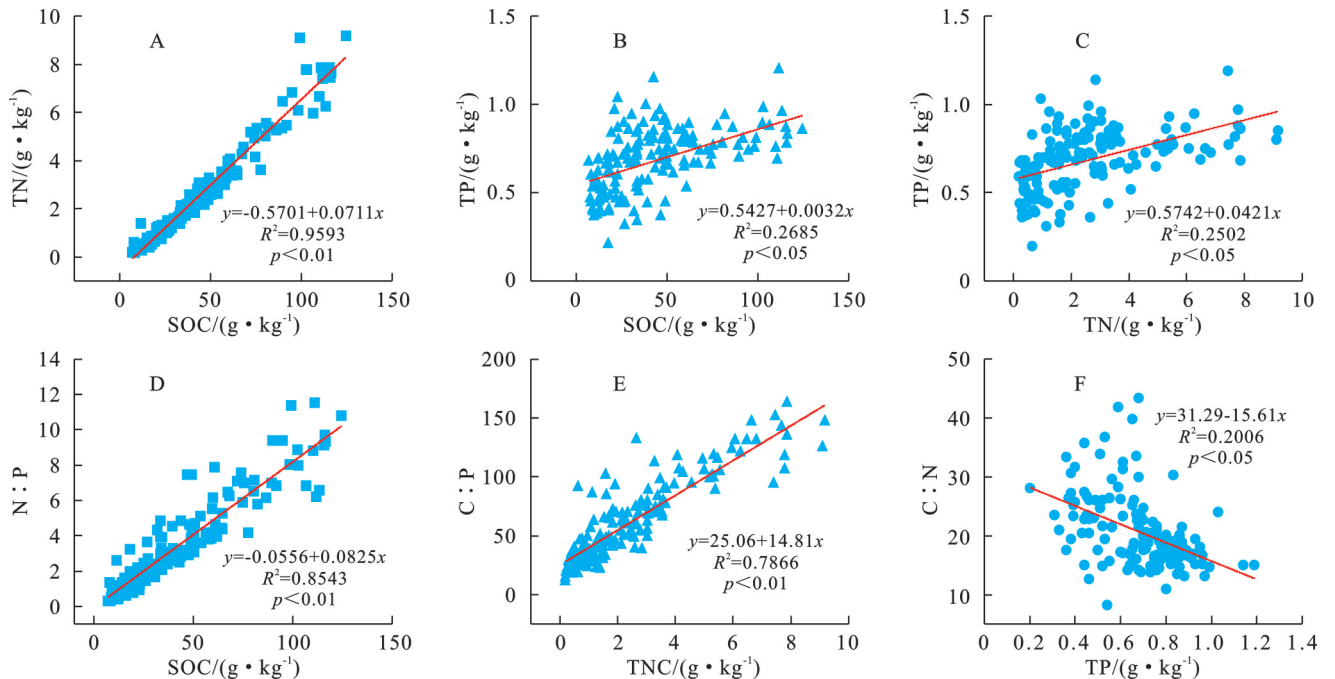


图 5 土壤 SOC、TN、TP 含量及其化学计量比间的关系
Fig. 5 Relationships between SOC, TN, and TP contents and their stoichiometric ratios

本研究还揭示了土壤养分垂直分布的显著差异。6 种混交林型的土壤 SOC 和 TN 含量随着土层加深呈明显递减趋势,表现出明显的“表聚”现象,而土壤 TP 含量在垂直剖面上的变化相对稳定,这与众多研究结果一致^[3,12]。表层土壤不仅接收大量植物枯落物输入,还具有更活跃的生物代谢活动,包括旺盛的微生物活动和密集根系分布,这些因素共同促进了养分的转化和表层积累^[4]。相比之下,磷元素主要来源于成土母质,其分布更多受矿物成分影响,因此在不同土层间的含量变化不明显。这一发现与

已有研究结论相符,进一步验证了针阔混交林土壤养分循环的基本规律。

3.2 混交比例对针阔混交林土壤化学计量比的影响
土壤生态化学计量比 C:N:P 是表征土壤质量、养分限制和森林养分循环的关键指标^[4]。这些比值不仅能反映土壤有机质分解与养分补给动态,还可揭示生态系统养分循环的异质性特征^[5]。本研究青海云杉和白桦 6 种混交林型的土壤 C:N 范围为 17.68~21.73,显著高于全国森林土壤(13.7)^[24]和全球森林土壤(13.33)^[4]。这一高 C:N 特征表明土壤微

生物对土壤有机质的分解能力较弱,有利于有机物的积累,同时也暗示该区域土壤具有较高的肥力潜力。同时,研究区土壤 C:P 和 N:P 范围分别为 62.79~76.61, 3.75~4.23, 皆高于全国森林土壤平均水平(44.5, 3.2), 表明相较于全国森林土壤, 该区域土壤磷元素的矿化释放过程受限, 生态系统可能面临更显著的磷限制。

本研究青海云杉和白桦 6 种混交林型土壤 C:N, C:P 和 N:P 在不同土层间存在显著差异, 但在不同林型中差异不显著。这与东北东部^[11]和南太行山区针阔混交林^[25]的研究结果一致。土壤 C:N 值能反映土壤有机质分解的难易程度, 较低的 C:N 通常表明土壤有机质矿化作用较快, 速效氮供应能力强^[20]。本研究同一林型的土壤 C:N 随着土层深度增加而升高, 这主要归因于有机质主要在表层土壤的富集, 使得表层土壤微生物活性较高, 氮矿化速率较快。然而, 不同混交林型的土壤 C:N 在不同混交林型未表现出显著差异, 可能是 C 和 N 作为土壤的结构性成分, 其积累与消耗过程通常维持相对稳定的比例^[26]。其次, 土壤微生物需要 C:N 约为 25:1 的底物来满足其氮需量, 并通过调节氮的固定与释放维持相对稳定的 C:N 动态平衡^[27], 从而导致不同林型间 C:N 差异不显著。土壤 C:P 和 N:P 是评估土壤磷素循环特征的重要指标, 其中 C:P 反映土壤对磷的吸收和固持能力, 而 N:P 可指示植物生长过程中土壤养分的有效性^[5-6]。本研究中各混交林型土壤的 C:P 和 N:P 均随土层加深而降低, 这可能与磷在土壤中的迁移性较弱有关: 磷主要以矿物结合态存在, 垂直迁移有限^[23], 因此其含量在不同土层分布较为均匀, 而 C:P 和 N:P 主要受 SOC 和 TN 含量的驱动。值得注意的是, 土壤 C:P 和 N:P 仅在 30—50 cm 土层表现出显著的林型间差异, 可能是因为青海云杉-白桦混交林的细根主要分布在 0—40 cm 土层, 不同混交林型的细根生物量及组成在 40 cm 处存在较大分异, 进而影响土壤微生物活性及元素转化效率, 最终导致土壤 C:P 和 N:P 的差异。

3.3 不同混交林型土壤化学计量特征与影响因子之间的关系

本研究祁连山东部青海云杉-白桦混交林土壤生态化学计量特征之间存在显著的协同关系(图 4、图 5)。其中, SOC 和 TN 含量之间呈现极强的线性相关性($R^2=0.9593$), 表明该区域土壤碳氮循环具有高度耦合性, 这一结果与全球多数针阔混交林结果一致^[3-4]。主成分分析显示前两个主成分 PC1 和 PC2 累计贡献率达 67.9%, 表明细根生物量与土壤其他性质的互作是共同调控混交林生态化学计量特征变异的

关键机制。SOC 和 TN 作为土壤有机质的关键指标, 其与 FRB 的显著正相关反映了植物根系活动通过凋落物输入和根系分泌物促进有机质积累^[25]。N:P 作为评估氮磷限制的关键指标, 植物根系可通过分泌物活化磷酸酶, 从而提升磷有效性并降低 C:P^[28]。第二主成分的高载荷表明土壤磷有效性与水分条件的协同效应进一步调控了养分循环。研究区森林生态系统受到更显著的磷限制特征, 已有研究表明, 土壤含水量可通过影响微生物活动和磷溶解性间接调控 C:P, 尤其在土壤含水量高的条件下, 磷释放增强, C:P 降低^[29]。值得注意的是, C:P 与 N:P 在 PC1 和 PC2 具有高协同性, 表明磷元素是调控区域养分循环的关键因子。有研究表明当土壤磷不足时, 微生物需分配更多能量分泌磷酸酶以获取磷, 导致氮矿化被抑制, TN 积累减少; 而在磷有效性较高时, 微生物活性增强, 凋落物分解和氮释放加速, 从而促进 SOC 与 TN 的同步积累^[30]。综上, 祁连山东部混交林土壤的化学计量平衡主要由碳氮耦合连同土壤磷的有效性与土壤水分协同调控的结果, 且土壤磷的影响最为显著。

4 结论

(1) 祁连山东部青海云杉-白桦混交林土壤 SOC、TN 及 C:N:P 比值皆高于全国森林土壤平均水平, 表现为高碳高氮分布特征, 且 P 元素释放受限, 该区植物生长受到磷限制。

(2) 随着青海云杉在混交林中占比增加, 土壤 SOC 和 TN 含量先增加后减少, 并分别在 P6B4 与 P8B2 林型中达到最大, 表明适度针阔混交可显著改善土壤理化性质, 提升土壤养分含量。

(3) 土壤 SOC、TN 和 C:N:P 比值受土层深度的影响大于混交林型及二者交互作用的影响。土壤 SOC、TN 与 C:N:P 之间均存在显著正相关关系, C:N 与 TP 之间存在显著负相关关系, 反映 C、N、P 耦合受土壤磷有效性调控。

参考文献(References):

- [1] Wang M M, Chen H S, Zhang W, et al. Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620:1299-1307.
- [2] Reich P B. Taking stock of forest carbon[J]. Nature Climate Change, 2011, 1(7):346-347.
- [3] Huang C L, Zhao C Z, Zhang P X, et al. Soil C, N, and P contents and their stoichiometry as impacted by main forest vegetation types in Xinglongshan, China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(1): 512-523.

- [4] Zhou J, Shi S, Chen J, et al. The influence of different vegetation types on soil C, N, P content, and their stoichiometry in the eastern Qilian Mountains' Binggou River Basin[J]. Academic Journal of Environment & Earth Science, 2024,6(1):96-108.
- [5] Willem Koerselman A F M 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.
- [6] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. Ecological Applications, 2010,20(1):5-15.
- [7] Chen X L, 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.
- [8] 董建辉,薛泉宏,张建昌,等.黄土高原人工混交林土壤肥力及混交效应研究[J].西北林学院学报,2005,20(3):31-35.
Dong J H, Xue Q H, Zhang J C, et al. Soil fertility characteristics and mixed effect of plantation forests on Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005,20(3):31-35.
- [9] 王曼,姜永孟,张世良,等.树种混交对侵蚀退化地马尾松林土壤酶活性和碳利用效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):264-272.
Wang M, Jiang Y M, Zhang S L, et al. Effects of mixing tree species on soil enzyme activity and carbon-use efficiency in eroded Masson pine forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):264-272.
- [10] 王跃超,李小英,杨能,等.不同混交比例云南松林土壤稳定性和养分特征[J].生态学杂志,2025,44(2):396-405.
Wang Y C, Li X Y, Yang N, et al. Soil stability and nutrient characteristics of *Pinus yunnanensis* forests with different mixed proportions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(2):396-405.
- [11] 王燕,张全智,王传宽,等.恢复方式对东北东部森林土壤碳氮磷计量特征的影响[J].植物生态学报,2024,48(7):943-954.
Wang Y, Zhang Q Z, Wang C K, et al. Effects of restoration approaches on forest soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in eastern Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024,48(7):943-954.
- [12] 祁海玉,付振杰,赵昌宏,等.青海大通河流域不同类型青杆林土壤生态化学计量特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2024,52(10):79-90.
Qi H Y, Fu Z J, Zhao C H, et al. Ecological stoichiometric characteristics of different types of *Picea wilsonii* forests in Datong River Basin of Qinghai[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2024,52(10):79-90.
- [13] 武锦艳,张华,李兴民.祁连山北坡不同纬度青海云杉及林下土壤化学计量特征[J].生态学报,2024,44(19):8508-8519.
Wu J Y, Zhang H, Li X M. Characterization of Qinghai spruce and understory soil chemometrics at different latitudes on the northern slopes of Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(19):8508-8519.
- [14] 霍雅娜,关晋宏,刘学琴,等.不同混交度青海云杉细根与土壤微生物的互作关系[J].森林与环境学报,2023,43(6):588-595.
Huo Y N, Guan J H, Liu X Q, et al. Interaction between fine roots of *Picea crassifolia* and soil microorganisms under different mingling degree stands[J]. Journal of Forest and Environment, 2023,43(6):588-595.
- [15] 徐莹,邓磊.祁连山不同混交度青海云杉林细根形态特征及与土壤理化性质的关系[J].水土保持研究,2023,30(3):181-187.
Xu Y, Deng L. Relationships of fine root morphology and soil physicochemical properties in different mingling intensity of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):181-187.
- [16] 陈凌云,龙永丽,申啸天,等.祁连山不同海拔青海云杉林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].西北师范大学学报:自然科学版,2023,59(6):111-120.
Chen L Y, Long Y L, Shen X T, et al. Ecological stoichiometry of soil C, N and P in different elevations of *Picea crassipes* forest in Qilian Mountains [J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 2023,59(6):111-120.
- [17] Wu X R, Chong P F, Xu E W, et al. Relationships between regeneration of Qinghai spruce seedlings and soil stoichiometry across elevations in a forest in northwestern China[J]. Forests, 2024,15(2):267.
- [18] 王亚东,魏江生,周梅,等.大兴安岭南段不同生长衰退程度山杨林生态化学计量特征[J].土壤通报,2021,52(4):854-864.
Wang Y D, Wei J S, Zhou M, et al. Ecological of stoichiometric characteristics of *Populus davidiana* forests with different growth and decline degrees in southern Daxing'anling [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(4):854-864.
- [19] 郭赵男.冰沟河流域土壤碳氮磷生态化学计量特征及影响因子研究[D].兰州:西北师范大学,2023.
Guo Z N. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus and its influencing factors in Binggou River basin [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.
- [20] 张广帅,邓浩俊,杜锟,等.泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征:以云南省小江流域为例[J].生态学报,2016,36(3):675-687.
Zhang G S, Deng H J, Du K, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: a case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(3):675-687.
- [21] 王凯,雷虹,石亮,等.沙地樟子松带状混交林土壤碳氮磷化学计量特征[J].应用生态学报,2019,30(9):2883-2891.

- Wang K, Lei H, Shi L, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* belt-mixed forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9):2883-2891.
- [22] 喻林华, 方晰, 项文化, 等. 亚热带4种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2016, 52(10):10-21.
- Yu L H, Fang X, Xiang W H, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in litter and soil of four types of subtropical stand[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(10):10-21.
- [23] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 磷在稻田土壤中的淋溶和迁移模拟研究[J]. 土壤, 2006, 38(6):734-739.
- Zhou Q L, Zhao M Q, Lu C Y, et al. Simulation of leaching and transport of P in paddy soil[J]. Soils, 2006, 38(6):734-739.
- [24] 刘焯, 秦娟, 毕庆康, 等. 北亚热带大别山区不同马尾松林型土壤酶活性及其化学计量比[J]. 土壤通报, 2024, 55(5):1416-1428.
- Liu Y, Qin J, Bi Q K, et al. Soil enzyme activities and its stoichiometric ratio of different *Pinus massoniana* forest types in Dabie Mountains, north subtropical region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5):1416-1428.
- [25] 崔秋芳, 程倩, 杨喜田. 南太行山区侧柏纯林及其混交林土壤生态化学计量特征[J]. 西部林业科学, 2020, 49(1):20-24, 30.
- Cui Q F, Cheng Q, Yang X T. Soil ecological stoichiometry characteristics of the *Platycladus orientalis* forest in the south Taihang Mountain[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(1):20-24, 30.
- [26] 邵宜晶, 俞梦笑, 江军, 等. 鼎湖山3种演替阶段森林土壤C:N:P现状及动态[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(6):523-530.
- Shao Y J, Yu M X, Jiang J, et al. Status and dynamic of soil C, N and P of three forest succession gradient in Dinghushan[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2017, 25(6):523-530.
- [27] Kaiser C, Franklin O, Dieckmann U, et al. Microbial community dynamics alleviate stoichiometric constraints during litter decay[J]. Ecology Letters, 2014, 17(6):680-690.
- [28] Aslam M M, Pueyo J J, Pang J Y, et al. Root acid phosphatases and rhizobacteria synergistically enhance white lupin and rice phosphorus acquisition[J]. Plant Physiology, 2022, 190(4):2449-2465.
- [29] Gross A, Lin Y, Weber P K, et al. The role of soil redox conditions in microbial phosphorus cycling in humid tropical forests[J]. Ecology, 2020, 101(2):e02928.
- [30] Luo X Z, Zhang L L, Lin Y B, et al. Nitrogen availability mediates soil organic carbon cycling in response to phosphorus supply: a global meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 185:109158.

(上接第154页)

- [21] 徐先英, 唐进年, 金红喜. 黄河首曲高寒草地沙化防治研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2019.
- Xu X Y, Tang J N, Jin H X. Study on Desertification Control of Alpine Grassland in the First Bend of the Yellow River[M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 2019.
- [22] 冯筱, 屈建军, 范庆斌, 等. 鼠兔(*Ochotona curzoniae*)洞穴堆积体对草地沙化的影响及防治[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3):168-176.
- Feng X, Qu J J, Fan Q B, et al. Impact of plateau pika burrow mounds on grassland desertification and control measures[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3):168-176.
- [23] Feng X, Qu J J, Tan L H, et al. Fractal features of sandy soil particle-size distributions during the rangeland desertification process on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(1):472-485.
- [24] Lehrs G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability[J]. Soil Science, 1998, 163(1):63-70.
- [25] Lehrs G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(5):1401-1406.
- [26] 蒋睿奇. 冻融土壤孔隙分布特征及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- Jiang R Q. Pore size distribution of freezing-thawing soil and its influencing factors[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [27] Zhang Y P, Fu Y, Xu J Z, et al. Impact of freeze-thaw cycling on the stability and turnover of black soil aggregates[J]. Geoderma, 2024, 449:117004.
- [28] Zhang Z, Ma W, Feng W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: a review[J]. Pedosphere, 2016, 26(2):167-179.
- [29] Amézketa E. Soil aggregate stability: a review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2/3):83-151.
- [30] 刘寒冰, 张互助, 王静. 失水干燥对路基压实黏质土抗剪强度特性的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(2):446-451.
- Liu H B, Zhang H Z, Wang J. Effect of dehydration on shear strength properties of compacted clayey soil[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2017, 47(2):446-451.