

计划火烧对滇中云南松根系碳氮磷生态化学计量特征的影响

卜祥威¹, 宋娅丽^{1,2,3}, 莫云仙⁴, 许琳¹, 王福升¹

[1.西南林业大学水土保持学院, 云南昆明 650224; 2.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南昆明 650224; 3.国家林业和草原局云南沾益岩溶生态系统定位观测研究站, 云南沾益 655500; 4.西南林业大学生态与环境学院(湿地学院), 云南昆明 650224]

摘要: [目的] 研究计划火烧对云南松(*Pinus yunnanensis*)根系和碳氮磷生态化学计量特征的影响, 为森林开展计划火烧的周期及根系养分管理工作提供科学依据。[方法] 以云南省玉溪市新平县照壁山计划火烧后 1 a 的火烧迹地为研究对象, 采集对照样地(UB)和火烧样地(PB)内的云南松乔木根系, 分析活根系生物量(*B*)、形态分布和根系有机碳(ROC)、根系全氮(RTN)、根系全磷(RTP)及生态化学计量特征的变化。[结果] ①火烧后 1 a 云南松不同径级 *B* 为 7.553~288.368 g/m², 在 0—20 cm 土层低于 UB(6.9%~21.5%); 火烧后 1 a 细根根系生物量密度(RBD)、根长密度(RLD)、根表面积密度(SAD)在 0—20 cm 土层降低(0.5%~21.5%), 细根和中根的比根长(SRL)、比表面积(SSA)在 0—20 cm 土层增加(4.1%~21.5%); ②火烧后 1 a 细根和中根 ROC 为 335.87~492.8 g/kg, RTN 为 1.934~5.724 g/kg, RTP 为 0.793~1.154 g/kg, 在 0—10 cm 土层升高(2.19%~38.35%); 火烧后 1 a 吸收根和运输根根系 C:N(RC:N) 为 58.646~140.45 g/kg、根系 C:P(RC:P) 为 299.336~422.846 g/kg, 在 10—20 cm 土层显著降低(29.57%~39.35%)(*p*<0.05); 不同径级根系 N:P(RN:P) 均小于 14, 可能受 N 限制; ③相关性分析表明, PB 下, SRL, SSA, RLD, RTN, RTP 及 RN:P 呈极显著正相关(*p*<0.001), *B*, RBD, ROC, RC:P, RC:N 呈极显著正相关(*p*<0.001)。[结论] 计划火烧后云南松通过协同细根高效吸收养分的形态可塑性与增加粗壮根系结构支撑性来响应火烧干扰, 并通过调整形态特征与化学计量性状适应火后恢复环境。

关键词: 计划火烧; 根系生物量; 根系形态; 云南松; 碳氮磷生态化学计量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0076-11

中图分类号: S718.5, S762.8

文献参数: 卜祥威, 宋娅丽, 莫云仙, 等. 计划火烧对滇中云南松根系碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 76-86. Bu Xiangwei, Song Yali, Mo Yunxian, et al. Effects of prescribed burning on ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in root system of *Pinus yunnanensis* in central Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 76-86.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.028

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.028

Effects of prescribed burning on ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in root system of *Pinus yunnanensis* in central Yunnan Province

Bu Xiangwei¹, Song Yali^{1,2,3}, Mo Yunxian⁴, Xu Lin¹, Wang Fusheng¹

[1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan

650224, China; 2.Key Laboratory of Evolution and Pollution Control of Mountain Rural Ecological

Environment in Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650224, China; 3.Yunnan Zhanyi Karst Ecosystem Positioning

Observation and Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Zhanyi, Yunnan 655500, China;

4.College of Ecology and Environment (College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China]

Abstract: [Objective] The effects of prescribed burning on the root system and the ecological stoichiometric

收稿日期: 2025-08-01

修回日期: 2025-10-19

采用日期: 2025-10-20

资助项目: 云南省科技厅面上项目“¹⁵N 稳定同位素示踪云南松土壤氧化亚氮排放对计划火烧响应的过程及机制”(202401AT070262); 云南省农业基础研究联合专项“计划火烧影响滇中亚热带云南松凋落物呼吸的微生物学机制”(202301BD070001-059)

第一作者: 卜祥威(1998—), 男(汉族), 山东省德州市人, 硕士研究生, 研究方向为计划火烧。Email: 1503905035@qq.com。

通信作者: 宋娅丽(1985—), 女(汉族), 山西省长治市人, 博士, 副教授, 主要从事生态系统过程与功能及小流域综合治理研究。Email: songyali19851205@sina.com。

characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in *Pinus yunnanensis* were investigated in order to provide a scientific basis for determining prescribed burning cycles and root nutrient management in forests. [Methods] The study was conducted in a burned area one year after prescribed burning at Zhaobi Mountain, Xiping County, Yuxi City, Yunnan Province. The root systems of *P. yunnanensis* were collected from an unburned control plot (UB) and a prescribed burning plot (PB). Changes in live root biomass (B), morphological distribution, root organic carbon (ROC), root total nitrogen (RTN), root total phosphorus (RTP), and their ecological stoichiometric characteristics were analyzed. [Results] ① One year after burning, root biomass (B) of *P. yunnanensis* across different diameter classes ranged from 7.553 to 288.368 g/m² and was 6.9%—21.5% lower than that in UB within the 0—20 cm soil layer. Fine root biomass density (RBD), root length density (RLD), and root surface area density (SAD) decreased by 0.5%—21.5% in the 0—20 cm soil layer one year after burning. In contrast, specific root length (SRL) and specific surface area (SSA) of fine and medium roots increased by 4.1%—21.5% in the same soil layer. ② One year after burning, the ROC, RTN, and RTP contents of fine and medium roots ranged from 335.87 to 492.8 g/kg, 1.934 to 5.724 g/kg, and 0.793 to 1.154 g/kg, respectively. These values increased by 2.19%—38.35% in the 0—10 cm soil layer. The root C:N (RC:N) ratios of absorbing and transporting roots ranged from 58.646 to 140.45 g/kg, while root C:P (RC:P) ratios ranged from 299.336 to 422.846 g/kg. Both ratios decreased significantly by 29.57%—39.35% in 10—20 cm soil layer ($p < 0.05$). The root N:P (RN:P) ratios across all diameter classes were below 14, suggesting potential N limitation. ③ Correlation analysis revealed that under PB conditions, SRL, SSA, RLD, RTN, RTP, and RN:P exhibited extremely significant positive correlations ($p < 0.001$), while B , RBD, ROC, RC:P, and RC:N also showed extremely significant positive correlations ($p < 0.001$). [Conclusion] Following prescribed burning, *P. yunnanensis* responds to fire disturbance by synergistically enhancing the morphological plasticity of fine roots for efficient nutrient acquisition and increasing the structural support provided by coarse roots, thereby adapting to the post-fire recovery environment through adjustments in both morphological and stoichiometric characteristics.

Keywords: prescribed burning; root biomass; root morphology; *Pinus yunnanensis*; ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus

计划火烧作为火干扰的一种重要营林手段在国内外均有广泛应用^[1],对保护森林有重要意义。火烧造成植物死亡,改变土壤理化性质,并通过改变森林养分分配格局,间接改变植物根系化学组成,进而影响植物细根向土壤输送养分的能力^[2]。林木根系作为重要的地下营养器官,在林木生长中具有锚定稳固和水分养分等资源获取的功能^[3],在树木生长发育中扮演重要角色。同时,具有多级分支结构的根系,各级分支的形态结构和生理功能存在明显差异^[4]。林木根系生物量的分配在根系对环境的适应过程中存在一定内在分配规律^[3]。火烧后外部土壤环境发生改变,而植物通过改变根系形态分布、功能和调整根系对养分资源的获取来增强对火后土壤环境的适应。研究^[5]表明,计划火烧对群落不会造成长时期影响,通过计划火烧手段,可有效提高土壤养分含量,有利于植物生长。

计划火烧后植被细根生物量一般呈现减少的趋势,根系形态存在异质性。闫相君等^[6]研究认为火烧样地根系数量减少,其中 < 2 mm径级的细根生物量

减少 30%~50%; $\geq 2\sim 4$ mm径级的根系生物量重度火烧下减少 50%。楚旭^[7]研究发现 4 种不同林型不同直径根系生物量在 0—20 cm 土层内差异极显著;兴安落叶松(*Larix gmelinii*)低强度火烧下,直径 ≤ 1 mm, 1~2 mm 和 2~5 mm 活细根与对照差异极显著。Parts 等^[8]研究表明,火烧后土壤增温导致云杉(*Picea asperata*)细根生物量降低,而其吸收根的根长、比根长以及比表面积增加。胡卸文等^[9]研究指出,林火会显著削弱植物根系系统,导致其数量、直径及质量与长度密度等关键形态指标下降。火烧通过改变土壤环境,驱动根系形态和生物量调整,进而影响不同径级根系养分吸收效率,反馈于根系养分浓度和化学计量特征。胡春雨^[10]研究发现计划火烧能提升红松林(*Pinus koraiensis*)与落叶松林(*L. gmelinii*)细根的 N 含量,降低细根 C:N,改变了林分根系的养分内循环状态。俞珺慈^[11]发现林火显著增加了马尾松(*Pinus massoniana*)根的 TN, N:P,显著减小了 TOC, TP 及 C:N。上述研究仅从一个方面揭示了火烧后根系形态、生物量或者根系养分的变

化规律;而各径级根系响应火烧后生物量变化、形态功能补偿、养分再分配策略的体系研究目前较为缺少。

云南省玉溪市新平县照壁山是中国云贵高原、横断山和青藏高原三大自然地理区域的结合部,典型高原山地丘陵地貌,海拔 1 990~2 050 m,是云南省亚热带北部与亚热带南部的过渡地带^[12]。新平县是云南省玉溪市森林面积最大且仅有的施行天然林保护工程的样地,同时也是云南的重点火险区,是云南省计划火烧的典型样地^[13]。

云南松(*Pinus yunnanensis*)作为西南地区的特有物种,在西南地区分布广泛,生态适应幅度很广,云南松富含油脂,林冠下地表凋落物极易燃烧,大部分云南松分布在森林火灾高发区^[14]。因此,本研究以新平县照壁山火烧后云南松林为研究对象,研究计划火烧后 1 a 云南松植物根系和碳氮磷生态学计量特征的变化规律,有利于加强对林火高发区植被恢复和根系变化的多维联动研究,旨在为森林开展计划火烧的周期及根系养分管理提供科学依据。



a 对照样地



b 计划火烧后恢复1a样地

图 1 试验样地基本情况

Fig.1 Basic information of sampling plots

1.2 样地设置

2023年2月开展计划火烧工作。在此期间,风速较低,依托现存防火通道并清除可燃物,形成良好的防火隔离带。用点火器点下山火,通过下山火点烧技术,降低林火蔓延速度,保证用火安全。消防人员监督和指导下计划火烧操作,燃烧区域和控制燃烧区域在坡度、方向和环境条件上相似。平均火焰高度 20 cm(使用钢卷尺测量),平均火焰温度 510 °C(使用手持红外测温仪测量),平均蔓延速度 0.2 m/min(使用秒表测量),平均熏黑高度 1.48 m(使用钢卷尺测量),为低强度计划火烧,完成计划火烧后,于 2024 年 4 月(2023 年计划火烧后 14 个月)在云南松林连续分

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于滇中高原云南省玉溪市新平县南部照壁山(102°0'7"—102°0'8"E, 24°2'38"—24°2'41"N),地处亚热带高原季风区过渡带,年均气温介于 17.4~23.8 °C,年均降水量 670~2 412 mm,随海拔上升年降水量依次增加,每年 5—10 月为雨季,其他月份为旱季。总日照时数 2 838.7 h,年均无霜期 312 d,是云南森林火灾的高发区和重灾区^[15-16]。区域乔木以云南松为主,灌木主要有南烛(*Vaccinium bracteatum*),草本植物主要有云南兔儿风(*Ainsliaea yunnanensis*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)、地三叶草(*Trifolium subterraneum*)等^[13]。照壁山的云南松林为 20 世纪 80 年代飞播造林后经自然稀疏、抚育管理形成的人工林,代表性土壤为红壤^[17]。研究区的计划火烧始于 2007 年,由于气候条件、空气质量和其他因素,2020, 2021 和 2024 年未开展计划火烧,其余每年均进行计划烧除。研究区为 2023 年 2 月开展计划火烧后恢复 1 a 的样地(图 1)。

布地区设置计划火烧样地(PB)和对照样地(UB)各 3 个(20 m×20 m),首先进行云南松林样地调查(表 1),完成后进行取样。每个大样地中各设置 3 个小样地。在每个小样地中按照 S 型随机选取 3 株标准木,每个大样地共 9 个采样点,UB 和 PB 各 27 个采样点。

1.3 根系采集与测定

采用挖掘法(30×30 cm)在计划火烧样地(PB)和对照样地(UB)靠近树干处(距离树干 20—30 cm),分 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 土层采集乔木根系样品,去掉枯枝落叶和腐殖质层,分别封好后放入冰袋进行低温保存。带回实验室后分离根系,根系用水泡软并进行反复冲洗,在网筛上冲洗样品,用

镊子分出活死根。活根为整个根系较为完整、颜色鲜艳、有弹性和韧性;死根则完整性较差、颜色较暗、弹性差、易折断并脱离根系。活根分不同径级,分别

为吸收根(<0.5 mm)、运输根($0.5\sim 2$ mm)、中根($2\sim 5$ mm)、粗根(>5 mm);吸收根与运输根合称细根。

表 1 云南松林分特征

Table 1 Stand characteristics of *Pinus yunnanensis*

样地	坡度	树高/m	胸径/cm	枝下高/m	密度/(株·hm ⁻²)
对照样地	20°	11.5~11.8	14.3~17.5	7.4~8.6	1 600~2100
火烧样地	16°	12.4~13.2	16.7~18.6	8.8~9.3	1 300~1500

用 Epson 数码扫描仪对不同林分、土层、径级的活根进行预处理,将其图像存储到电脑中,并用 WinRHIZO 植物根系影像分析系统进行形态指标测定,得到根长 R_L (m)和根表面积 RSA (m²)。将相应根系分别装入信封内,放入 65 °C 烘箱烘至恒质量 R_B (g)。依据土壤取样体积 V (m³),依次得到根系生物量密度(RBD)、根长密度(RLD)、根表面积密度(SAD)、比根长(SRL)和比表面积(SSA)、根系生物量(B)。计算公式为

$$RBD = R_B / V \quad (1)$$

式中:RBD 为根系生物量密度(g/m³); R_B 为根烘干后恒质量(g); V 为土壤取样体积(m³)。

$$RLD = R_L / V \quad (2)$$

式中:RLD 为根长密度(cm/cm³); R_L 为根长(cm)。

$$SAD = RSA / V \quad (3)$$

式中:SAD 为根表面积密度(m²/m³); RSA 为根表面积(m²)。

$$SRL = R_L / R_B \quad (4)$$

式中:SRL 为比根长(m/g); R_L 为根长(m); R_B 为根烘干后恒质量(g)。

$$SSA = RSA / R_B \quad (5)$$

式中:SSA 为比表面积(cm²/g); RSA 为根表面积(cm²)。

$$B = R_B / (L^2 \times 10^{-4}) \quad (6)$$

式中: B 为根系生物量(g/m²); R_B 为根烘干后恒质量(g); L 为取样土方的边长($L=30$ cm)。

将采集的根系烘干粉碎后测定植物根系有机碳(ROC)、全氮(RTN)、全磷(RTP)。采用重铬酸钾-外加加热法测定植物有机碳(ROC);采用凯氏定氮法测定植物全氮(RTN);采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定植物全磷(RTP)。

1.4 数据分析与处理

采用 Excel 对数据进行整理并计算平均值和标准差。采用 SPSS 25.0 分析计划火烧下根系生物量(B)、根系有机碳(ROC)、根系全氮(RTN)、根系全磷(RTP)及生态化学计量比和根系形态指标的差

异,显著性水平设定为 0.05。采用软件 Origin 2024 绘制根系生物量(B)、根系形态、ROC, RTN, RTP 及生态化学计量比柱状图;并绘制相应的相关性热图。

2 结果与分析

2.1 计划火烧后的根系生物量和密度特征

由图 2 可知,计划火烧后 1 a,计划火烧样地(PB)下吸收根(XS)和运输根(YS)的 B , RBD 在 0—10 cm, 10—20 cm 土层分别显著低于对照样地(UB) (18.9% 和 11.3%~21.5% 和 14%) ($p<0.05$);中根和粗根 B , RBD 在 0—10 cm 土层分别显著低于 UB (12.6% 和 18%) ($p<0.05$)。吸收根、运输根和中根 B , RBD 随着土层加深而递减;而粗根 B , RBD 随着土层加深先升高后降低,在 10—20 cm 土层分布最多。各径级 B , RBD 在垂直梯度 0—10 cm, 10—20 cm 不同土层之间均存在显著差异($p<0.05$)。

2.2 计划火烧后根长密度和根表面积密度的变化

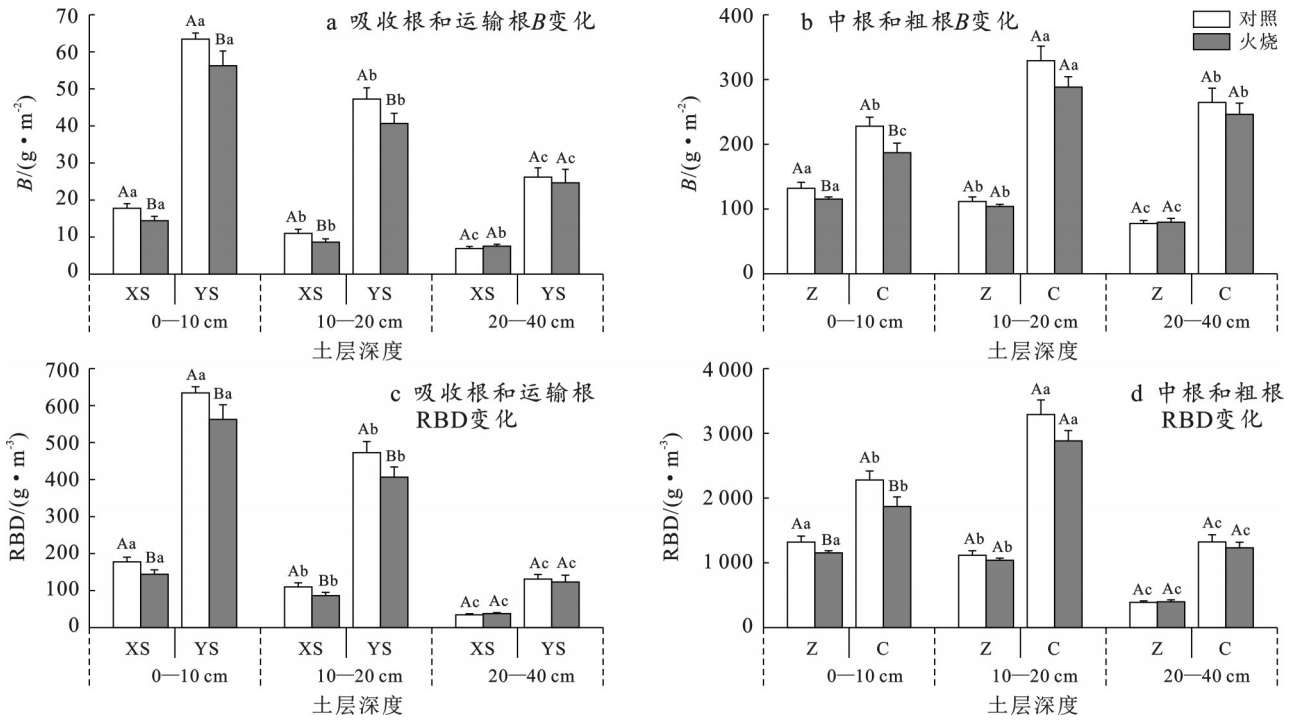
由图 3 可知,计划火烧后 1 a,计划火烧样地(PB)下吸收根 RLD 在 0—10 cm, 10—20 cm 土层显著低于 UB (14.7% 和 17.9%) ($p<0.05$),同时吸收根和运输根、粗根 SAD 在上述土层低于 UB (0.5%~14.9%)。中根和粗根 RLD 在 0—10 cm 土层分别低于 UB (7.5%, 11.1%),而中根 SAD 在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层分别高于 UB (5.8% 和 2.1%)。在垂直梯度上,吸收根、运输根和中根 RLD, SAD 随着土层加深而显著递减($p<0.05$);粗根 RLD, SAD 随着土层加深先升高后降低,10—20 cm 土层分布最高且与其他土层存在显著差异($p<0.05$)。

2.3 计划火烧后比根长和比表面积的变化

由图 4 可知,计划火烧后 1 a,计划火烧样地(PB)吸收根和运输根 SRL、运输根和中根及粗根 SSA 在 0—10 cm 土层显著高于 UB (5.2%~21.5%) ($p<0.05$),吸收根 SSA 在各土层高于 UB (5%~8.4%),吸收根和运输根 SRL 在 10—20 cm, 20—40 cm 土层高于 UB (1.8%~4.3%);中根和粗根 SRL 在 0—10 cm 土层以及中根 SRL 在 10—20 cm 土层高于 UB

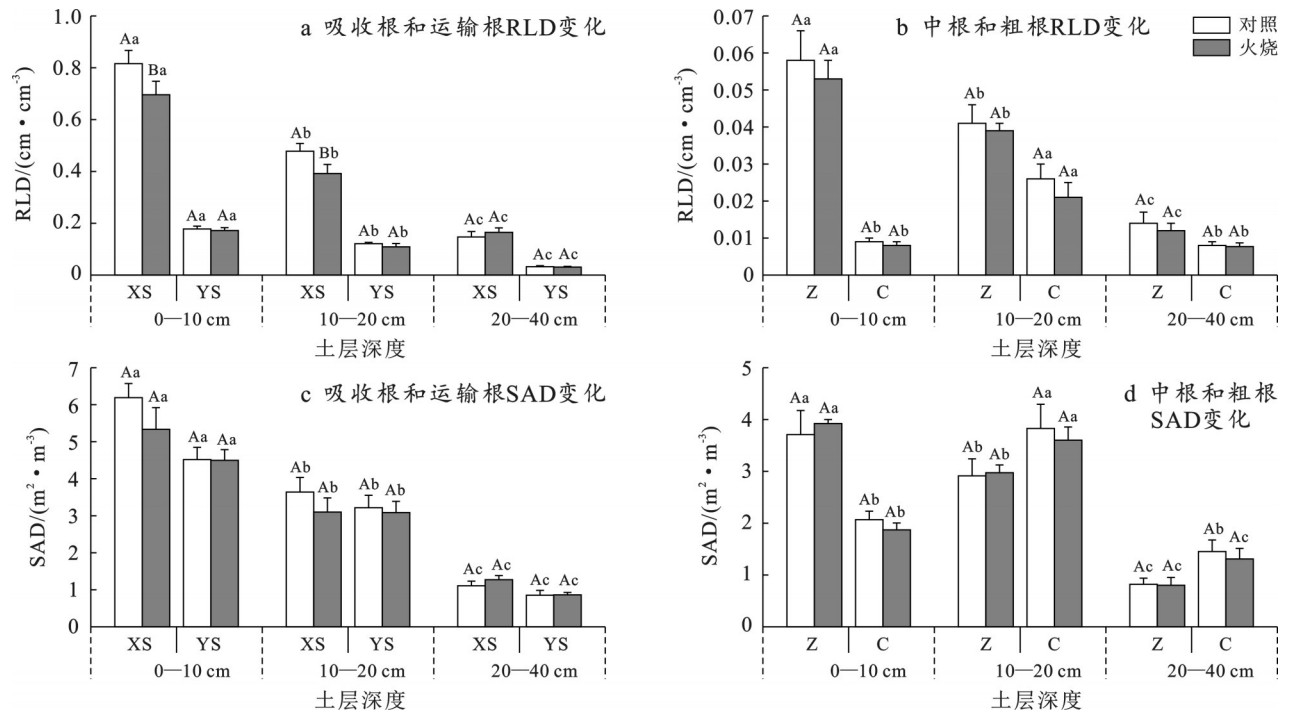
(4.1%~5.5%),而运输根、中根SSA在10—20 cm土层分别显著高于UB(11.5%和9.8%)($p<0.05$)。吸收根、运输根、中根SRL和SSA随着土层加深而递

减;粗根SRL,SSA随着土层加深先升高后降低,在10—20 cm土层最高,在垂直梯度0—10 cm,10—20 cm不同土层之间存在显著差异($p<0.05$)。



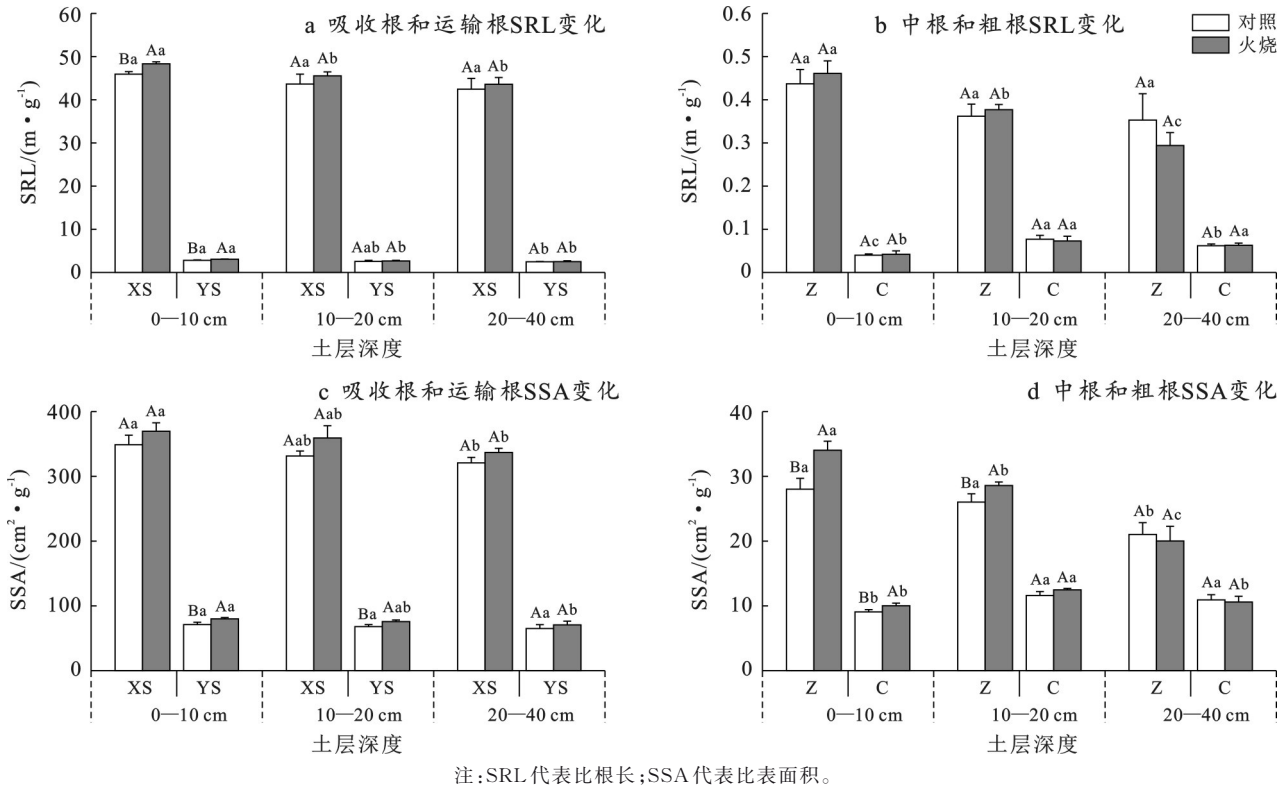
注:①大写字母代表同一类型根系,同一土层不同处理之间的差异;小写字母代表同一类型根系,同一处理不同土层之间的差异。②B代表根系生物量;RBD代表根系生物量密度;XS代表吸收根;YS代表运输根;Z代表中根;C代表粗根。下同。

图2 计划火烧对不同土层乔木各径级活根系生物量和密度的影响
 Fig.2 Effects of prescribed burning on live root biomass and root biomass density of tree roots across different diameter classes in different soil layers



注:RLD代表根长密度;SAD代表根表面积密度。

图3 计划火烧对不同土层乔木各径级根系根长密度和表面积密度的影响
 Fig.3 Effects of prescribed burning on root length density and root surface area density across different diameter classes of trees in different soil layers



注: SRL 代表比根长; SSA 代表比表面积。
图 4 计划火烧对不同土层乔木各径级根系比根长和比表面积的影响
Fig.4 Effects of prescribed burning on specific root length and specific surface area of tree roots across different diameter classes in different soil layers

2.4 计划火烧后碳氮磷及生态化学计量特征

2.4.1 计划火烧对根系碳氮磷的影响

由图 5 可以看出,火烧恢复 1 a 后,乔木细根和中根 ROC, RTN, RTP 含量在 0—10 cm 土层高于 UB (2.19%~38.35%),表明火烧导致 0—10 cm 土层细根、中根根系 C, N, P 养分含量增加趋势;在垂直梯度上, PB 下在 0—10 cm 土层各径级 ROC (434.13~492.8 g/kg), 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 RTN 和 RTP 含量 (0.69~5.724 g/kg) 高于其他土层,揭示了火烧对根系 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 RTN 和 RTP, 0—10 cm 土层 ROC 的影响,根系养分在表土富集规律;在根系径级上, PB 下吸收根、运输根在各土层对 N, P 资源的吸收显著高于其他径级的根系 ($p < 0.05$),细根对火烧更为敏感,植物细根对 N, P 养分吸收更为显著,表现出高形态可塑、高养分吸收的规律。

2.4.2 计划火烧后碳氮磷生态化学计量特征

由图 6 可以看出,计划火烧后 1 a,计划火烧样地 (PB) 吸收根和运输根根系 C:N, C:P (RC:N, RC:P) 显著低于 UB (13.89%~39.35%) ($p < 0.05$), 0—10 cm 土层中根和粗根 RC:N, RC:P 高于 UB (1.03%~8.69%);计划火烧显著降低了细根 RC:N, RC:P,表明细根对计划火烧的响应更为强烈,火烧促进了细根的营养富集;PB 下吸收根和运输根 RC:N, RC:P 最大变化主要集中于 10—20 cm 土层,在

10—20 cm 土层最少的趋势,表明对计划火烧响应具有分层性。计划火烧后 1 a, PB 下吸收根、运输根根系 N:P (RN:P) 在 0—10 cm, 10—20 cm 土层均高于 UB (4.4%~13.59%),表明计划火烧提高了细根在 0—20 cm 土层 RN:P。PB 下吸收根、运输根和粗根 RN:P 在 0—10 cm, 10—20 cm 土层高于 20—40 cm 土层,中根在 0—10 cm 土层最高的趋势,同样证明根系对火烧响应具有分层性。不同径级根系 RN:P 平均值均小于 14,揭示火烧虽然改变了养分计量比,但仍受 N 限制主导。

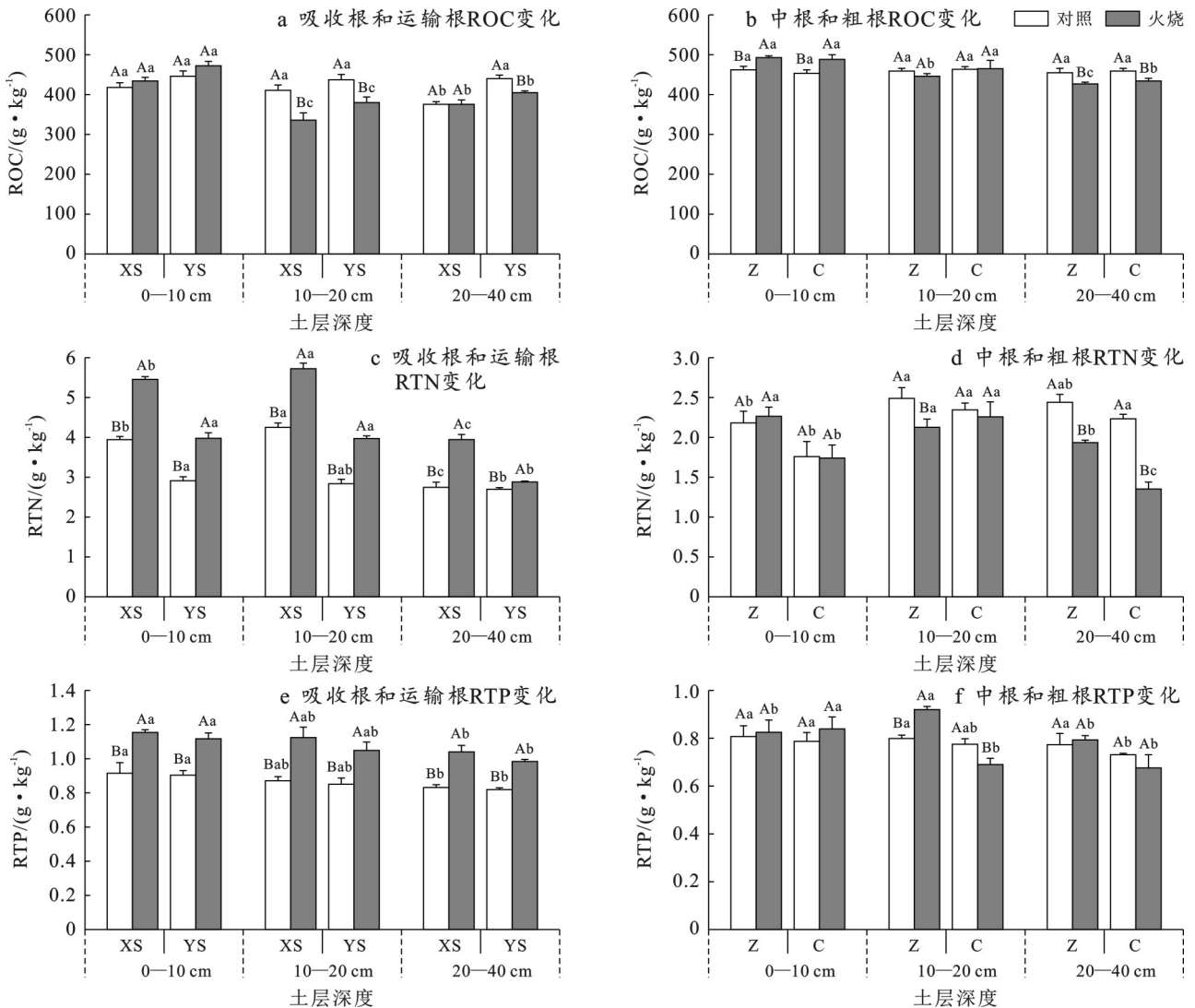
2.5 计划火烧后根系特性和碳氮磷生态化学计量特征的关系

2.5.1 对照样地根系特性和碳氮磷生态化学计量特征的关系

由图 7 可知,对照样地 (UB) B 和 ROC, RC:N, RC:P 呈极高显著正相关 ($p < 0.001$), RBD 和 ROC, RC:N, RC:P 呈极高显著正相关 ($p < 0.001$),反映了以高根生物量,高根密度,高碳含量为特征的“构建型”策略,植物将更多资源投入到构建结构坚固的粗根。RLD 和 RTN, RTP, RN:P 呈极高显著正相关 ($p < 0.001$); SAD 和 RN:P 显著正相关 ($p < 0.05$),与 RTN 含量高显著正相关 ($p < 0.01$),与 RTP 极高显著正相关 ($p < 0.001$); SRL 和 RTN, RTP, RN:P 含量呈极高显著正相关 ($p < 0.001$); SSA 与 RTN, RTP,

RN:P含量极高显著正相关($p < 0.001$);揭示了以细根长、大根表面积、高养分含量为特征的“获取型”策

略。这两个策略内部的性状高度协同,共同决定了植物的地下资源获取利用策略。



注:ROC代表根有机碳;RTN代表根全氮;RTP根全磷。

图5 计划火烧对乔木不同土层各径级根系有机碳、全氮和全磷的影响
Fig.5 Effects of prescribed burning on root organic carbon, total nitrogen and total phosphorus of trees across different diameter classes in different soil layers

2.5.2 火烧样地根系特性和碳氮磷生态化学计量特征的关系

由图8可知,计划火烧样地(PB)B和ROC, RC:P, RC:N呈极高显著正相关($p < 0.001$),RBD与ROC, RC:N, RC:P极高显著正相关($p < 0.001$),反映了植物投资粗壮根系,将更多资源构建地下根系结构的“构建型”策略。RLD和RTN, RTP, RN:P极高显著正相关($p < 0.001$);SAD和RTN, RN:P高显著正相关($p < 0.01$),与RTP显著正相关($p < 0.05$);SRL和RTN, RTP, RN:P极高显著正相关($p < 0.001$);SSA和RTN, RTP, RN:P极高显著正相关($p < 0.001$);上述关系体现了细根通过投资SRL, SSA等性状来高效吸收养分的“获取型”策略

关系。火烧后根系通过这两个“二元投资策略”关系,促进植物恢复和生长。

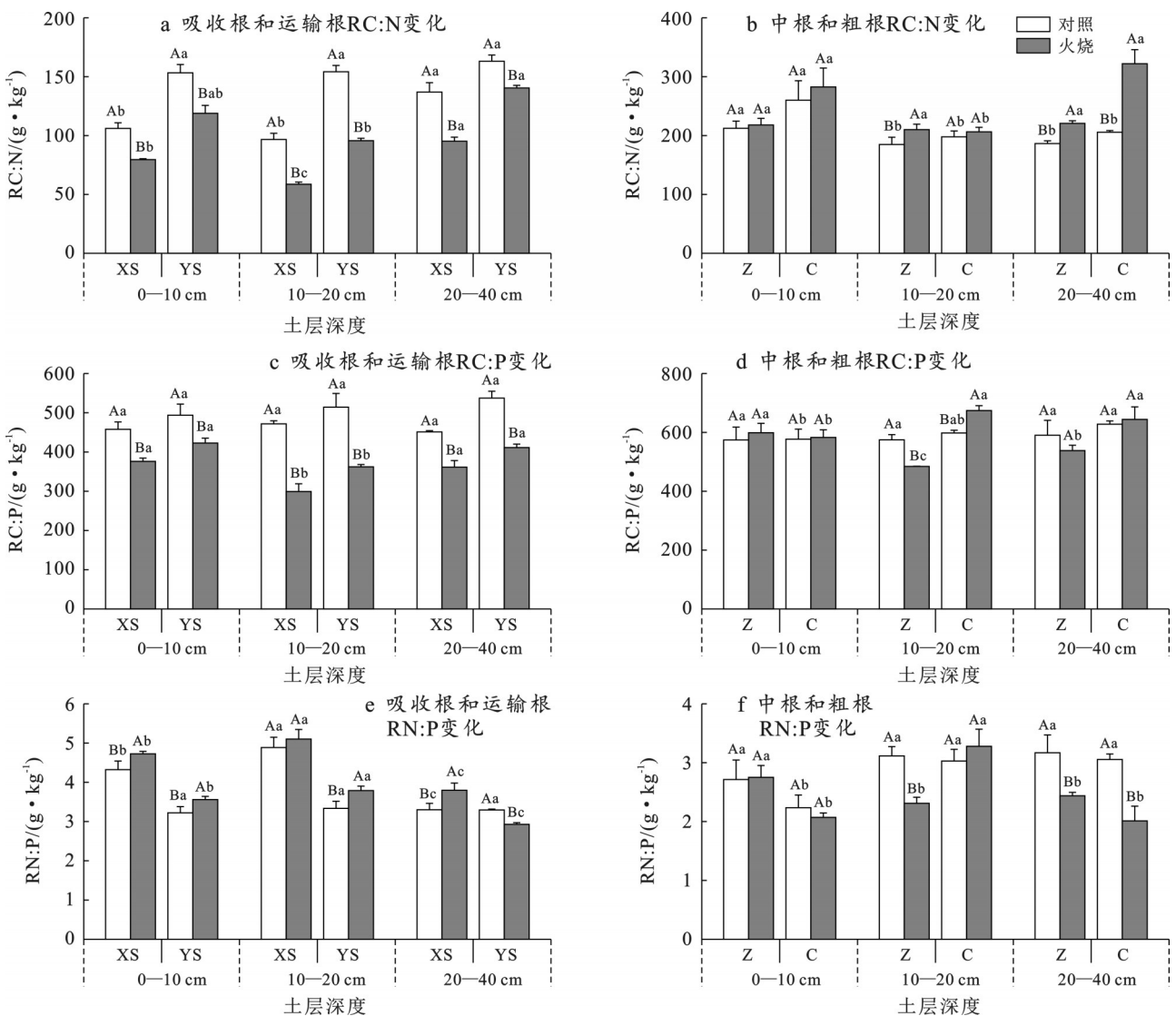
3 讨论

3.1 计划火烧后根系特征的变化

计划火烧后1 a,云南松乔木不同径级B在0-10 cm,10-20 cm土层均低于UB,说明0-10 cm和10-20 cm土层根系并未恢复到火烧前水平,该结果与以往研究结论一致^[18-20]。这可能是由于0-10 cm和10-20 cm土层B受计划火烧影响较大,根系死亡较多。火烧后1 a,云南松乔木不同径级根系形态特征存在异质性。火烧后1 a,PB下细根RBD, RLD, SAD在0-10 cm和10-20 cm土层均小于UB,这与胡卸

文等^[9]研究一致,可能是计划火烧导致根系腐烂死亡, *B*减少以及新生根系恢复生长年限较短。火烧后 1 a, PB下 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中根 SAD 高于 UB, 原因可能是火烧后部分根系在高温作用下失水收缩^[9]导致死亡,同时中根受火烧影响比细根小,火后恢复时间较短,中根增加与土壤接触面积,促进对自身所需养分资源的吸收和利用, SAD 增加不明显;也有可能是因为中根兼具运输养分和支撑固着功能,火烧后树木生长恢复时期较短,刺激根系萌生,导致 SAD 增加不显著。火烧后 1 a, PB下粗根 RBD, RLD, SAD 在 0—10 cm 土层低于 UB,可能是火烧导致部分径级较粗的根外皮收缩、失水死亡,恢复时间较短。火烧后云南松

RBD, RLD 和 SAD 在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层变化差异高于 20—40 cm 土层,反映了火烧对根系形态密度指标的影响集中在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层。更大 SRL 和 SSA 有利于根系高效吸收养分,促进林木生长。本研究火烧后 1 a, PB下吸收根、运输根、中根在 0—10 cm 和 10—20 cm、粗根在 0—10 cm 的 SRL 和 SSA 均高于 UB,比 UB 有更大 SRL 和 SSA。原因可能是火烧恢复后,植物为了满足生长需要,抵抗逆境环境,刺激根系生长,新生细根分枝多且细长, SRL 较大,更有利于吸收水分养分。火后根系形态上的增加弥补根系生物量减少带来的损失,体现“高吸收效率,低生物量”适应模式。



注: RC:N 表示根 C:N 数值;RC:P 表示根 C:P 数值;RN:P 表示根 N:P 数值。

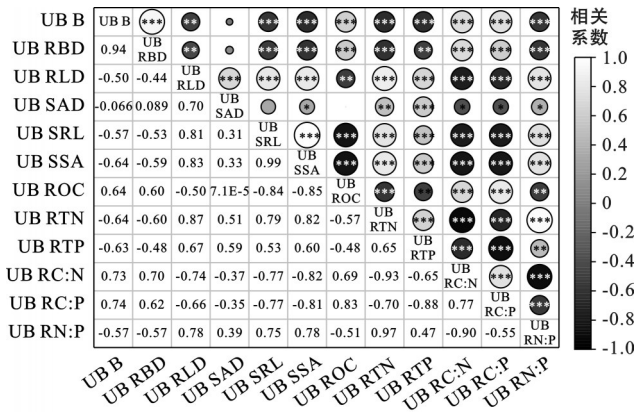
图 6 计划火烧对乔木不同土层各径级根系生态化学计量比的影响

Fig.6 Effects of prescribed burning on ecological stoichiometric ratios of root systems across different diameter classes in different soil layers

本研究中云南松乔木吸收根、运输根和中根的 *B*, RBD, RLD 和 SAD, SRL 和 SSA 在垂直梯度上均随土层加深而减小,这与杨向东等^[21]研究结果相

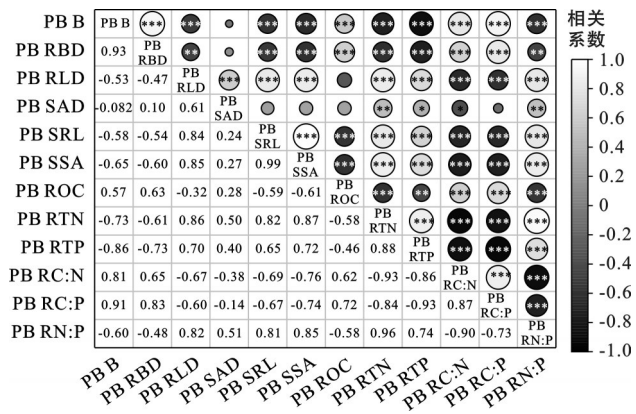
似,可能与表层养分富集有关;粗根 *B*, SRL, SSA 随土层加深先增加后减少的趋势且主要分布在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层。上述变化可能与植物细根

主要承担吸收功能,径级较粗的根系主要具有结构支撑、储藏等功能有关^[22],本研究表明0—10 cm土层大量细根和较细的根有利于林木吸收养分,10—20 cm和20—40 cm土层大量粗根有利于林木在土壤中固定和支撑,维持树木整体构型,根系在垂直梯度上的精准适应和最优投资更有利于火后恢复和生长。



注: ①UB B表示对照样地根系生物量;UB RBD表示对照样地根系生物量密度;UB RLD表示对照样地根长密度;UB SAD表示对照样地根表面积密度;UB SRL表示对照样地比根长;UB SSA表示对照样地比表面积;UB ROC表示对照样地根有机碳含量;UB RTN表示对照样地根全氮含量;UB RTP表示对照样地根全磷含量;UB RC:N表示对照样地根C:N数值;UB RC:P表示对照样地根C:P数值;UB RN:P表示对照样地根N:P数值。②*表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关,**表示在 $p < 0.01$ 水平高显著相关,***表示在 $p < 0.001$ 水平极高显著相关。

图7 对照样地根系特性和碳氮磷因子的关系
Fig.7 Relationships between root characteristics and carbon, nitrogen and phosphorus factors in control plots



注: ①PB B表示火烧样地根系生物量;PB RBD表示火烧样地根系生物量密度;PB RLD表示火烧样地根长密度;PB SAD表示火烧样地根表面积密度;PB SRL表示火烧样地比根长;PB SSA表示火烧样地比表面积;PB ROC表示火烧样地根有机碳含量;PB RTN表示火烧样地根全氮含量;PB RTP表示火烧样地根全磷含量;PB RC:N表示火烧样地根C:N数值;PB RC:P表示火烧样地根C:P数值;PB RN:P表示火烧样地根N:P数值。②*表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关,**表示在 $p < 0.01$ 水平高显著相关,***表示在 $p < 0.001$ 水平极高显著相关。

图8 火烧样地根系特性和碳氮磷因子的关系
Fig.8 Relationships between root characteristics and carbon, nitrogen and phosphorus factors in prescribed burning plots

3.2 计划火烧后碳氮磷及生态化学计量特征的变化

火烧后,火烧迹地地表养分释放,植物通过改变根系形态增加了对养分资源的吸收利用,导致0—10 cm土层细根和中根ROC, RTN, RTP含量增加。火烧对0—10 cm和10—20 cm土层根系影响较大,根系吸收养分适应环境变化,导致各径级ROC, RTN, RTP分别在0—10 cm,0—10 cm和10—20 cm土层最高。在根系径级上,细根对火烧的响应更为敏感^[23],植物在火后恢复初期生长阶段对N的需求较高^[24],从而调节细根的形态特征,显著提高了N的吸收效率;火后土壤pH值升高改变了土壤的有效性,在酸性土壤中,pH值的升高可以从铁、铝氧化物和氢氧化物中解吸P进而提高P的生物利用率^[25],导致细根对N, P资源的吸收利用最为显著。

C元素是植物各种生理生化过程的底物和能量来源,N, P是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素^[26],植物C:N和C:P反映植物对N, P元素的利用效率,而N:P代表植物养分限制状况^[27]。PB下吸收根和运输根RC:N, RC:P显著低于UB,且最大变化主要集中于10—20 cm土层。可能是由火烧后C投资效率化,植物高效吸收更多的N, P养分,以及随着火后恢复期延长,N, P等可溶性养分在外界作用下淋溶到10—20 cm土层,导致养分富集,更有利于植物吸收,促使细根RC:N, RC:P显著低于UB。0—10 cm土层中根和粗根ROC含量显著高于UB,导致0—10 cm土层中根和粗根根系C:N, C:P高于UB。N和P通常是森林生态系统中植物生长的主要限制性养分^[28], $N:P < 14$ 可以认为是受N限制, $N:P > 16$ 是受P限制^[29]。本研究中,RN:P平均值小于14,表明植物根系可能不受根系P限制,而受根系N限制,这可能与土壤N以及火后恢复初期植物对N需求更多有关^[24]。火烧后植物高效吸收土壤表层N, P养分,同时植物可能受N限制,火后恢复初期对N需求更大^[24],促使细根中N的积累相对P较多,导致火烧提高了细根在0—20 cm土层RN:P。植物C, N, P化学计量比的变化,会通过根系对C, N, P养分资源的吸收利用来影响植物生长。

3.3 计划火烧后根系特征与碳氮磷因子的关系

根系SRL和SSA有助于植物吸收养分,当环境变化时,植物通过多种途径对根系形态结构进行调整,使根系不断形态重塑以适应环境改变,植物根系表现出可塑性^[30]。本研究发现火烧后1 a, SRL, SSA, RLD与RTN, RTP, RN:P呈极高显著正相关($p < 0.001$);SAD和RTN, RN:P呈高显著正相关($p < 0.01$),与RTP呈显著正相关($p < 0.05$)。植物通

过细根形态可塑性进而增强根系对生境变化的适应性^[21],本研究中火烧后土壤环境改变,植物通过增加 SRL, RLD, SSA, SAD 来吸收 N, P 养分,增加了细根 N, P 含量,反映了植物对高效吸收养分策略的投资。火烧后外界环境明显变化,植物仍能通过调节根系形态和吸收策略维持水分养分资源供给,表现出适应火后环境的一种高效资源获取适应策略。同时火烧后 1 a, B, RBD 和 ROC, RC:N, RC:P 呈极高显著正相关($p < 0.001$),火烧后地表灰分输入地下,为植物生长提供 N, P, K 等养分资源,促进植物生长,植物光合作用产生大量碳水化合物一部分输入到根部^[31],合成纤维素、木质素等结构性物质,帮助植物构建新的地下根系,促进了 B, RBD 的恢复增加,而根结构性物质主要以 C 为主,因此,ROC, RC:N, RC:P 恢复增加。计划火烧后 1 a 根系特征和碳氮磷因子的关系,体现了植物适应环境变化的一种“二元投资策略”。一方面细根通过增加 SRL, SSA 等性状来高效吸收养分,另一方面通过增加粗壮根系,构建地下根系结构,用于储存利用养分资源,从“二元投资”方面促进植物生长。

4 结论

(1) 计划火烧后 1 a,火烧对云南松 0—20 cm 土层 B 产生负影响,根系尚未完全恢复,但植物通过增加 SRL, SSA, 形成“高吸收效率,低生物量”的适应性策略,以补偿生物量的损失并高效获取资源。

(2) 火烧后 1 a,改变了云南松根系养分和化学计量比,提高了 N, P 养分的吸收利用效率,并且云南松根系生长可能主要受 N 限制,而非 P 限制。

(3) 火烧后 1 a,云南松通过“二元投资策略”适应环境,一方面构建具有高 SRL 和 SSA 的细根以高效吸收养分;另一方面同步构建粗壮根系以增加生物量进行结构支撑与碳储存。这两种策略协同作用,共同保障了云南松在火后干扰环境中的恢复与生长。

参考文献 (References)

[1] 孙龙,胡春雨,胡同欣.计划火烧对红松人工林细根生物量的影响[J].生态学杂志,2024,43(2):362-371.
Sun Long, Hu Chunyu, Hutong Xin. Effect of prescribed burning on fine root biomass of *Pinus koraiensis* plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43 (2) : 362-371.

[2] 胡海清,魏书精,孙龙,等.气候变化、火干扰与生态系统碳循环[J].干旱区地理,2013,36(1):57-75.
Hu Haiqing, Wei Shujing, Sun Long, et al. Interaction among climate change, fire disturbance and ecosystem carbon cycle [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1) :

57-75.

[3] 李林鑫,郑姗姗,许建伟,等.林木根系生物量分配影响机制研究进展[J].世界林业研究,2022,35(2):15-20.
Li Linxin, Zheng Shanshan, Xu Jianwei, et al. Research advance in influence mechanism of tree root biomass allocation [J]. World Forestry Research, 2022, 35(2):15-20.

[4] 胡星,刘庆,赵春章,等.不同增温模式对西南亚高山针叶林云杉养分及其化学计量特征的影响[J].应用与环境生物学报,2024,30(1):83-89.
Hu Xing, Liu Qing, Zhao Chunzhang, et al. Effects of different warming patterns on nutrients and stoichiometric characteristics of spruce trees in alpine coniferous [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(1):83-89.

[5] 罗绍华,宗春森,王兰新,等.计划烧除对林下植物的影响分析:以曼搞保护区为例[J].山东林业科技,2019,49(1):35-39.
Luo Shaohua, Zong Chunmiao, Wang Lanxin, et al. Analysis of effects of plan burning on undergrowth plants: Take Mangao nature reserve for example [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2019, 49(1):35-39.

[6] 闫相君,王云琦,祁子寒,等.火烧迹地根系分布对浅层含根土土水特征及渗透特性的影响[J].中国水土保持科学,2023,21(3):42-51.
Yan Xiangjun, Wang Yunqi, Qi Zihan, et al. Influences of root distribution on the soil water characteristics and permeability characteristics of shallow root-bearing soil in the burned areas [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(3):42-51.

[7] 楚旭.大兴安岭地区主要树种细根生物量及受火干扰影响研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2017.
Chu Xu. Fine root biomass of main species and effects of fire disturbance on great Xing'an Mountain region [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2017.

[8] Parts K, Tedersoo L, Schindlbacher A, et al. Acclimation of fine root systems to soil warming: Comparison of an experimental setup and a natural soil temperature gradient [J]. Ecosystems, 2019, 22(3):457-472.

[9] 胡卸文,侯羿腾,王严,等.火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响[J].水文地质工程地质,2019,46(5):106-112.
Hu Xiewen, Hou Yiteng, Wang Yan, et al. Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5):106-112.

[10] 胡春雨.计划火烧对东北地区三种人工林细根生物量及土壤有机碳的影响[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2023.

- Hu Chunyu. Effects of prescribed burning on fine root biomass and soil organic carbon of three artificial forests in northeast China [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2023.
- [11] 俞珺慈. 林火对亚热带马尾松林植被凋落物: 土壤化学计量动态特征的影响[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2024.
- Yu Junci. Effects of forest fire on vegetation-litter-soil stoichiometric dynamics in subtropical *Pinus massoniana* forest [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [12] 田荣, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林土壤理化性质及可蚀性的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 11-16.
- Tian Rong, Chen Qibo, Li Jianqiang, et al. Effects of prescribed burning on soil physicochemical properties and erodibility in *Pinus yunnanensis* forests [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 11-16.
- [13] 闫想想, 张文文, 王秋华, 等. 低强度计划火烧对滇中地区云南松纯林可燃物的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(6): 83-87.
- Yan Xiangxiang, Zhang Wenwen, Wang Qiuhua, et al. The influence of low-intensity prescribed burning on the combustible materials of *Pinus yunnanensis* pure forest in central Yunnan [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(6): 83-87.
- [14] 徐伟恒, 黄邵东, 杨磊, 等. 滇东北地区云南松地表可燃物载量及火强度研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48(4): 19-26.
- Xu Weiheng, Huang Shaodong, Yang Lei, et al. Surface fuel load and fire intensity of *Pinus yunnanensis* in northeast Yunnan Province [J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(4): 19-26.
- [15] Hong Ruicheng, Zhu Xilong, Ma Cheng, et al. The effect of prescribed burning on the growth and regeneration of *Pinus yunnanensis* [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 578: 122460.
- [16] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 计划烧除对云南松林地表可燃物火行为的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(5): 69-76.
- Zhang Wenwen, Yan Xiangxiang, Wang Qiuhua, et al. Effects of prescribed burning on fire behavior of surface fuel in *Pinus yunnanensis* forest land [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(5): 69-76.
- [17] 赵雨田, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林枯落物蓄积特征及持水性能的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 99-104.
- Zhao Yutian, Chen Qibo, Li Jianqiang, et al. Effects of prescribed burning on accumulation and water holding capacity of litters in *Pinus yunnanensis* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 99-104.
- [18] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 108-118.
- Hu Haiqing, Luo Sisheng, Luo Bizhen, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *Cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 108-118.
- [19] 时应贵, 熊德成, 叶旺敏, 等. 土壤和大气增温对杉木幼树细根生物量和叶片性状的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(7): 1916-1923.
- Shi Yingui, Xiong Decheng, Ye Wangmin, et al. Effects of soil and air warming on fine root biomass and leaf traits of Chinese fir saplings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(7): 1916-1923.
- [20] 李树朝. 不同林地清理方式对 10 年生木荷生物量的影响[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(4): 58-59.
- Li Shuzhao. Effects of different forest land clearing methods on the biomass of 10-year-old *Schima superba* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(4): 58-59.
- [21] 杨向东, 邓磊. 共和盆地东缘不同林龄青杨人工林细根生物量和形态特征[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 8-16.
- Yang Xiangdong, Deng Lei. Fine root biomass and morphological characteristics in *Populus cathayana* plantations at different ages along the eastern margin of the Gonghe Basin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 8-16.
- [22] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021-1029.
- Wang Shufeng, Hu Yunxue, Sun Haijing, et al. Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 1021-1029.
- [23] Yin Chunying, Pu Xiaozhen, Xiao Qunying, et al. Effects of night warming on spruce root around non-growing season vary with branch order and month [J]. Plant and Soil, 2014, 380(1): 249-263.
- [24] 郝凤, 于铁峰, 刘晓静, 等. 不同氮效率型苜蓿氮素吸收差异与根系形态的关系及其对氮的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2428-2434.
- Hao Feng, Yu Tiefeng, Liu Xiaojing, et al. Relationship between nitrogen uptake and root morphology of alfalfa with different nitrogen efficiency and its response to nitrogen [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(11): 2428-2434.