

白枪杆幼苗 C、N、P 化学计量特征与生物量对降雨变化的响应

赵启泽¹ 茶晓飞² 郑绍傑¹ 王元友¹ 韦兴兰¹ 董琼^{1*}

(1. 西南林业大学林学院, 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 昆明 650224; 2. 怒江州林业和草原局, 怒江傈僳族自治州 673299)

摘要 探讨不同降雨变化对白枪杆(*Fraxinus malacophylla*)幼苗生长及 C、N、P 化学计量特征的影响, 可为白枪杆幼苗在喀斯特植被恢复中的应用提供理论依据。该研究以 2 年生白枪杆实生苗为对象, 通过设置增雨 40%、减雨 40%、自然降雨 3 种雨量梯度, 以及 5 d 和 10 d 2 种降雨时间间隔处理, 探究白枪杆幼苗生物量及 C、N、P 化学计量特征对降雨格局变化的响应。结果表明: (1) 延长降雨间隔及减雨处理对白枪杆幼苗、根、茎、叶生物量积累均有抑制作用, 而增雨处理则相反; (2) 增雨处理下白枪杆幼苗叶 C 和 P 含量显著上升 ($P < 0.05$), 而叶 N 含量显著下降 ($P < 0.05$); 减雨处理下, 降雨时间间隔为 5 d 时, 根 C、N、P, 茎 C、P 和叶 C、N 含量显著减少 ($P < 0.05$); 延长降雨间隔, 白枪杆幼苗根、茎和叶 C、N、P 含量均显著下降 ($P < 0.05$); (3) 减雨和自然降雨下, 白枪杆幼苗叶 N:P(质量比) > 16 , 表明生长受 P 限制; 增雨处理下, 幼苗叶 N:P 为 14~16, 表明生长受 N 和 P 共同限制。白枪杆通过调节各器官生物量积累及 C、N、P 化学计量特征应对降雨变化。上述结果可为喀斯特地区植被恢复及白枪杆栽培管理提供一定的科学依据。

关键词 降雨量; 降雨时间间隔; 生态化学计量; 生物量; 白枪杆

中图分类号: S728.9 文献标志码: A doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2025.05.005

Response of Stoichiometric Characteristics of C, N and P and Biomass of *Fraxinus malacophylla* Seedlings to Rainfall Changes

ZHAO Qize¹ CHA Xiaofei² ZHENG Shaojie¹ WANG Yuanyou¹ WEI Xinglan¹ DONG Qiong^{1*}

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Southwest Forestry University, Kunming 650224; 2. Nujiang Forestry and Grassland Bureau, Nujiang Lisu Autonomous Prefecture 673299)

Abstract The aim of this study was to explore the effects of variations in rainfall on the growth and C, N, P stoichiometric characteristics of *Fraxinus malacophylla* seedlings, which could provide a theoretical basis for the application of *F. malacophylla* seedlings in karst vegetation restoration. In this study, two-year-old *F. malacophylla* seedlings were used as materials, and the treatments with 40% increased rainfall, 40% reduced rainfall, natural rainfall, and 5- and 10-day rainfall intervals were set, and the responses of seedling biomass and C, N, P stoichiometric characteristics were investigated, respectively. The results showed that both extending the rainfall interval and reducing rainfall significantly inhibited biomass accumulation of seedlings, roots, stems, and leaves, whereas increasing rainfall had an opposite effect. Leaf C and P contents significantly increased ($P < 0.05$), whereas leaf N content significantly decreased under the increased rainfall ($P < 0.05$). Under the reduced rainfall, the contents of C, N, and P in roots, C and P in stems, C and N in leaves significantly decreased at a five-day rainfall interval ($P < 0.05$). The contents of C, N, and P in roots, stems, and leaves significantly decreased at a 10-day rainfall interval ($P < 0.05$). Under the conditions of reduced and natural rainfalls, the leaf N:P ratio was greater than 16, indicating that the growth of seedlings was limited by P. Under the increased rainfall, the leaf N:P ratio ranged from 14 to 16, indicating that the growth of seedlings was limited by both N and P. The above results revealed that *F. malacophylla* seedlings responded to rainfall

基金项目: 西南林业大学基金项目(110823045; 2022Y581)。

第一作者简介: 赵启泽(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究。

* 通信作者: E-mail: dqyeam@swfu.edu.cn。

收稿日期: 2024 年 12 月 10 日。

changes by regulating the biomass accumulation and C, N, P stoichiometric characteristics in organs. The findings could provide a scientific basis for restoration of vegetation in Karst regions and for the cultivation and management of *F. malacophylla*.

Key words rainfall; rainfall interval; ecological stoichiometry; biomass; *Fraxinus malacophylla*

近年来,受全球气候变暖影响,高温、暴雨、干旱等极端天气频发,致使动植物大量死亡^[1],已严重威胁生态环境及人类生存^[2]。全球气候变暖会改变陆地生态系统水循环的强度和过程,导致全球降雨格局(如降雨间隔、降雨强度等)发生变化^[1]。王佳敏^[3]研究结果表明:降雨间隔延长抑制桢楠(*Phoebe zhennan*)侧枝生长及茎、叶的生物量积累。周双喜等^[4]发现,总降雨量增加 50.0% 使大针茅(*Stipa grandis*)幼苗生长季末的地上生物量平均增加 23.0%,而降雨间隔时间由 5 d 增长为 15 d 使地上生物量平均增加 48.8%。因此,研究不同降雨格局对植物生长的影响具有重要意义。

植物化学计量特征是植物长期适应环境的结果^[5]。植物生态化学计量(ES)研究有助于揭示植株代谢需求与环境元素供应之间的耦合关系^[6]。碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物生命活动中必需的基本元素,在植物组织构建和生理活动中起着重要作用,同时也对生态系统结构和功能稳定性作出了重要贡献,促进生态系统物质循环,在植物-土壤化学元素循环中发挥着重要作用^[7-9]。李新乐等^[10]研究发现,降雨量增加会显著减少白刺(*Nitraria tangutorum*)幼苗根部 C 和 P 含量及茎部 C 含量,而油蒿(*Artemisia ordosica*)幼苗的茎部和叶片 C 含量则显著增加。董雪等^[11-12]研究结果表明,降雨量的增加导致沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)各器官 N 和 P 含量增加。黄菊莹等^[13]研究指出,降雨变化改变了植物叶片的 C:N:P(质量比),且不同物种间受影响的程度不同:在减雨 50% 条件下,牛枝子(*Lespedeza potaninii*)叶片 N 和 P 含量及猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)叶片 P 含量增加;而在增雨(30% 和 50%)条件下,猪毛蒿叶片 N 含量减少。可以看出,不同植物对降雨变化采取不同的应对策略。

白枪杆(*Fraxinus malacophylla*)为木樨科(Oleaceae)柃属(*Fraxinus*)落叶乔木^[14],因耐旱、耐贫瘠、成长迅速、造林成活率高及自然更新能力强等优良特性,广泛应用于西南石漠化地区的生态修复^[14-15]。研究^[16]表明,2000—2020 年西南石漠化区年降雨量具有高度可变的分布特征。贵

州、广西和云南东南部大部分地区降雨量呈增加趋势,年均增加 5~10 mm,为植被恢复和生态质量改善提供了良好的气象条件。同时,云南省西北部和东部的降雨量呈下降趋势,且连续无有效降雨日增长^[16]。因此,本研究旨在探讨不同降雨条件下白枪杆幼苗生长特征及各器官元素化学计量特征。通过探究白枪杆对不同降雨模式的适应性,期望为喀斯特地区的植被恢复、白枪杆幼苗培育及栽培管理提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在云南省昆明市西南林业大学格林温室大棚中进行。温度常年保持在 16~30 °C,空气相对湿度 23%~67%,光照充足。试验以云南省建水县 2 年生白枪杆实生苗为研究对象。2022 年 6 月 8 日将白枪杆幼苗移至西南林业大学,炼苗 90 d 后,将白枪杆袋苗移栽至盆高 20 cm、直径 18 cm 花盆内定植。供试土壤取自云南省建水县,该县有大范围喀斯特地貌。试验前,测定供试土壤理化性质:田间持水量为 26.43%,土壤有机碳质量分数为 32.43 g·kg⁻¹,总氮质量分数为 0.86 g·kg⁻¹,总磷质量分数为 0.41 g·kg⁻¹,水解氮质量分数为 45.63 mg·kg⁻¹,速效磷质量分数为 11.78 mg·kg⁻¹,pH 为 5.52,环刀法测得土壤容重为 1.31 g·cm⁻³。

1.2 模拟降雨格局变化

试验于 2022 年 10—12 月进行,选取长势良好、无病虫害的白枪杆苗木进行控水试验,以浇水量和浇水时间间隔模拟降雨量和降雨间隔期。1988—2017 年昆明市年均降雨量为 975.5 mm,1999 年降雨量最多,为 1 449.9 mm,较年均降雨量增加 49%;2009 年降雨量最少,为 565.8 mm,较年均降雨量减少 42%^[17]。近 70 a 降雨量数据表明,昆明市最大年降雨量是多年平均值的 1.3~1.6 倍,最小年降雨量是多年平均值的 0.5~0.7 倍^[18]。以月平均降雨量为对照(W),增雨处理降雨量较对照增雨 40%(W+),减雨处理降雨量较对照减雨 40%(W-)。基于 1990—2017 年逐年降雨量数据,统计降雨间隔发生频率可知,降雨间隔 5 d 以内

的降雨事件发生频率最大^[19],故以 5 d 为间隔模拟自然降雨频次,10 d 为延长降雨间隔,分别用 T、T+ 表示。试验共设置 6 个处理,每个处理 16 株苗,每个处理重复 3 次,共计 288 株苗。试验设计如表 1。

表 1 降雨量和降雨时间设置

Table 1 Rainfall and rainfall duration settings

组别 Groups	降雨时间间隔 Rainfall intervals/d	组别 Groups	降雨量 Rainfall/mL
T	5	W-	80
		W	133
		W+	186
T+	10	W-	160
		W	266
		W+	372

注:T.降雨时间间隔为 5 d;T+.降雨时间间隔为 10 d;W-.减少降雨 40%;W.月平均降雨量;W+.增加降雨量 40%;下同。

Note:T denoted a 5-d rainfall interval, T+ denoted a 10-d rainfall interval, W- denoted a 40% decrease in rainfall, W denoted the average monthly rainfall, and W+ denoted a 40% increase in rainfall; the same as below.

1.3 测定项目与方法

于 2023 年 1 月 3 日,对每个处理组随机选取 3 株供试苗木。整株取样,用清水将植株冲洗干净带回实验室。将幼苗分为根、茎、叶,分别装入信封放入烘箱,先以 120 °C 杀青 0.5 h,再以 80 °C 烘干至恒质量。分别测定根、茎、叶干质量,根(茎、叶)生物量分配比=根(茎、叶)干质量/总生物量。将烘干的根、茎、叶磨碎过 0.15 mm 孔径筛网,分别测定 C、N、P 含量。采用重铬酸钾法测定 C 含量,奈氏比色法测定 N 含量,钼锑抗比色法测定 P 含量^[20]。

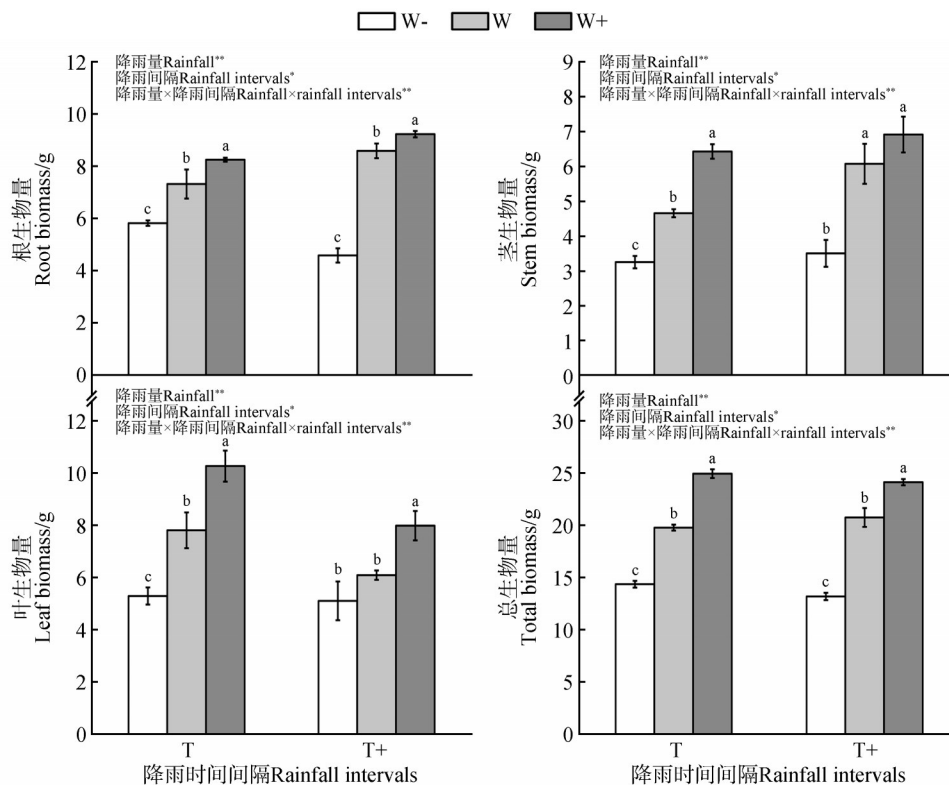
1.4 数据处理

使用 Excel 2021 整理试验数据。使用 SPSS 25 对白枪杆各器官生物量,C、N、P 含量及其比值进行双因素方差分析(two-factor ANOVA)、相关分析和主成分(PCA)分析。使用 Origin 2021 制图。

2 结果与分析

2.1 模拟不同降雨格局对白枪杆生物量的影响

降雨量与降雨时间间隔的交互作用对根干质量有极显著影响(图 1, $P < 0.01$),对茎和叶干质量



不同小写字母表示相同降雨时间不同降雨量间差异显著($P < 0.05$),* $P < 0.05$,** $P < 0.01$ 。

Different lowercase letters indicated significant differences ($P < 0.05$) between different rainfall amounts at the same rainfall duration, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

图 1 降雨格局对白枪杆生物量的影响

Fig.1 Effects of rainfall patterns on the biomass of *F. malacophylla*

及总生物量有显著影响($P<0.05$)。降雨量对根、茎、叶干质量和总生物量有极显著影响($P<0.01$)。降雨时间间隔对茎和叶干质量有极显著影响($P<0.01$),对根干质量有显著影响($P<0.05$)。

降雨时间间隔相同时,降雨量增加均促进了根、茎、叶生物量的积累(图1)。与对照组相比,降雨减少40%、降雨时间间隔为5 d时,根、茎、叶及总生物量分别显著减少20.48%、30.22%、32.26%、27.42%($P<0.05$);降雨时间间隔为10 d时,根、茎及总生物量分别显著减少46.65%、42.39%、36.46%($P<0.05$),叶生物量减少16.18%($P>0.05$)。

与对照组相比,降雨增加40%、降雨时间间隔为5 d时,根、茎、叶及总生物量分别显著增加12.73%、38.16%、31.56%、26.14%($P<0.05$);降雨时间间隔为10 d时,根、叶及总生物量分别显著增加7.47%、31.15%、16.29%($P<0.05$),茎生物量增加13.89%($P>0.05$)。

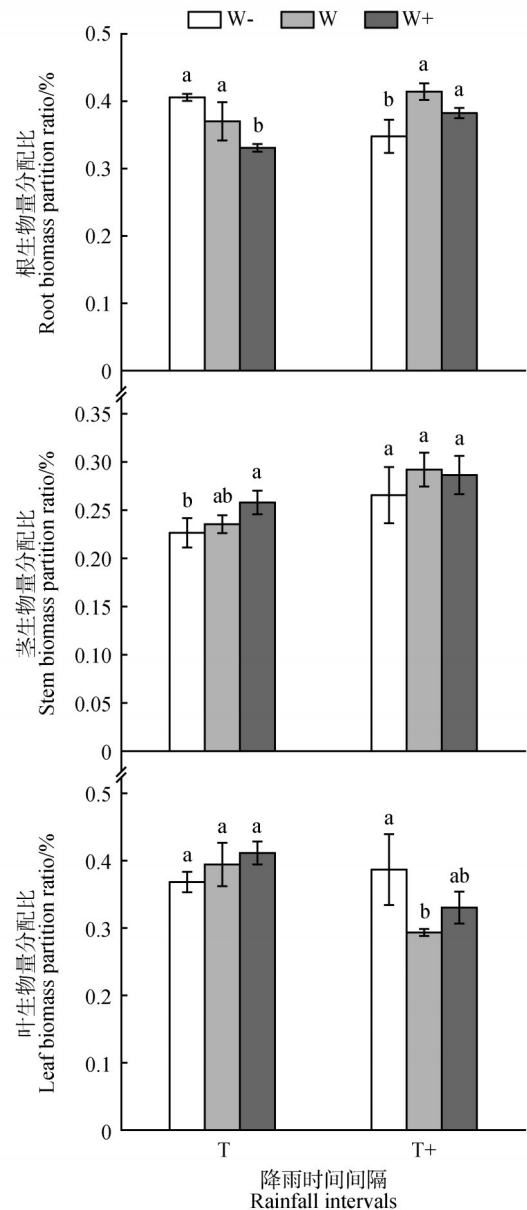
与对照组相比,降雨减少40%、降雨时间间隔为5 d时,根生物量分配比增加9.56%,茎和叶生物量分配比减少3.83%、6.68%(图2);降雨时间间隔为10 d时,根生物量分配比显著减少16.02%($P<0.05$),叶生物量分配比显著增加31.76%($P<0.05$),茎生物量分配比减少9.20%($P>0.05$)。

降雨量增加40%、降雨时间间隔为5 d时,根生物量分配比显著减少10.6%($P<0.05$),茎和叶生物量分配比增加9.54%、4.28%($P>0.05$);降雨时间间隔为10 d时,根和茎生物量分配比减少7.63%、1.97%($P>0.05$),叶生物量分配比增加12.73%($P>0.05$)。以上结果表明,不同降雨格局会影响植物各器官生物量分配,从而影响植物生长。

2.2 模拟不同降雨格局对白枪杆C、N、P化学计量特征的影响

降雨量与降雨时间间隔的交互作用对根、茎、叶C含量及叶N含量有极显著影响(表2, $P<0.01$),对根和茎P含量有显著影响($P<0.05$)。降雨量对根、茎、叶的C、N、P含量均有极显著影响($P<0.01$),降雨时间间隔对根、茎、叶的N、P及茎和叶C含量有极显著影响($P<0.01$),对根C含量有显著影响($P<0.05$)。

降雨时间间隔相同时,降雨量增加,白枪杆幼苗根、茎C、P含量及叶N含量呈先增加后减少趋势(图3),根、茎N含量及叶C、P含量呈增加趋势。与对照组相比,降雨量减少40%、降雨时间间隔为5 d时,根C、N、P含量分别显著减少10.05%、



不同小写字母表示相同降雨时间不同降雨量间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicated significant differences ($P<0.05$) between different rainfall amounts at the same rainfall duration.

图2 降雨格局对白枪杆生物量分配的影响

Fig.2 Effects of rainfall patterns on biomass allocation of *F. malacophylla*

37.23%、31.32%($P<0.05$);茎C、N、P含量分别显著减少7.62%、38.60%、31.44%($P<0.05$);叶C、N、P含量分别显著减少8.16%、17.80%、48.75%($P<0.05$)。降雨时间间隔为10 d时,根C、N、P含量分别显著减少22.90%、37.26%、37.26%($P<0.05$);茎C、N、P含量分别显著减少21.51%、24.85%、36.88%($P<0.05$);叶C、N、P含量分别显著减少20.15%、44.45%、28.70%($P<0.05$)。

表 2 降雨量和降雨时间间隔对白枪杆各器官 C、N、P 含量及其比值的双因素方差分析

Table 2 Two-factor analysis of variance (ANOVA) of rainfall amounts and rainfall intervals on C, N and P contents and their ratios in various organs of *F. malacophylla*

元素 Element	器官 Organ	降雨量 Rainfall amounts	降雨时间间隔 Rainfall intervals	降雨量×降雨时间间隔 Rainfall×rainfall interval
C	根 Root	260.29**	6.96*	59.84**
	茎 Stem	62.21**	14.07**	23.53**
	叶 Leaf	88.07**	30.41**	10.08**
N	根 Root	205.74**	56.86**	1.22
	茎 Stem	120.03**	59.11**	1.54
	叶 Leaf	245.21**	109.41**	92.89**
P	根 Root	158.44**	41.27**	3.95*
	茎 Stem	166.01**	47.02**	4.04*
	叶 Leaf	243.88**	209.64**	1.74
C:N(质量比)	根 Root	57.43**	137.14**	12.02**
	茎 Stem	33.90**	54.25**	17.65**
	叶 Leaf	4.38	57.68**	31.35**
C:P(质量比)	根 Root	26.74**	29.33**	8.88*
	茎 Stem	12.94**	48.93**	3.32
	叶 Leaf	78.76**	61.23**	30.49**
N:P(质量比)	根 Root	6.73*	87.43**	1.33
	茎 Stem	9.73**	32.21**	6.71*
	叶 Leaf	54.97**	40.74**	38.43**

注:表中数据为 F 值, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

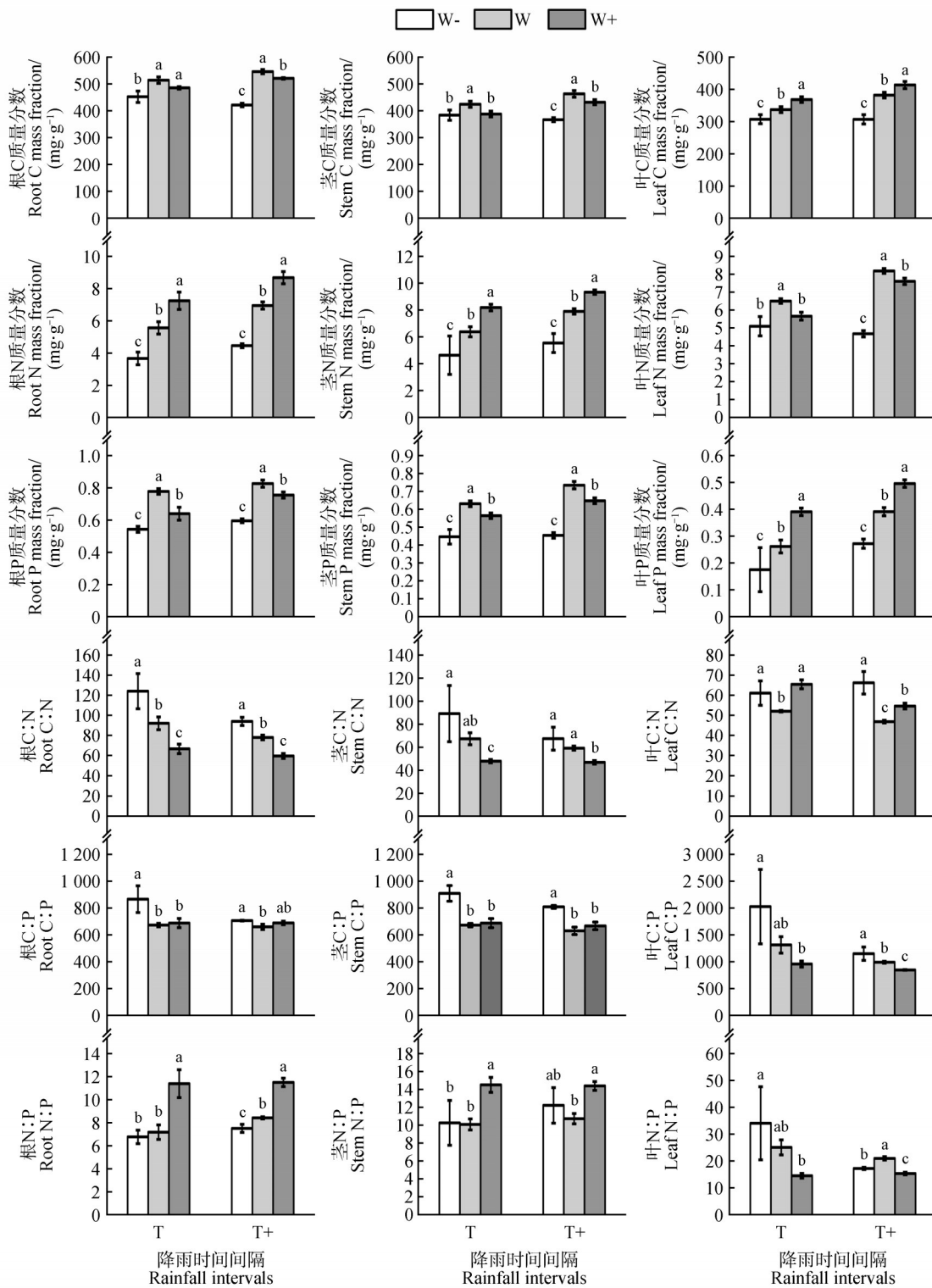
Note: The data in the table were F -values, * $P < 0.05$, and ** $P < 0.01$.

降雨量增加 40%、降雨时间间隔为 5 d 时,根 N 含量显著增加 30.32% ($P < 0.05$),根 P 含量显著减少 17.84% ($P < 0.05$),根 C 含量减少 5.59% ($P > 0.05$);茎 C、P 含量分别显著减少 8.69%、10.65% ($P < 0.05$),茎 N 含量增加 28.50% ($P < 0.05$);叶 C、P 含量显著增加 9.35%、49.65% ($P < 0.05$),叶 N 含量显著减少 3.02% ($P < 0.05$)。降雨时间间隔为 10 d 时,根 C、P 含量分别显著减少 4.62%、8.67% ($P < 0.05$),根 N 含量显著增加 24.87% ($P < 0.05$);茎 C、P 含量分别显著减少 6.74%、11.93% ($P < 0.05$),茎 N 含量显著增加 18.29% ($P < 0.05$);叶 C、P 含量显著增加 8.31%、26.99% ($P < 0.05$),叶 N 含量显著减少 7.10% ($P < 0.05$)。

降雨量与降雨时间间隔的交互作用对根和茎 C:N(质量比)及叶 C:N、C:P(质量比)、N:P(质量比)有极显著性影响(表 2, $P < 0.01$),对根 C:P 和茎

N:P 有显著影响 ($P < 0.05$)。降雨量对根 C:N、C:P 和茎 C:N、C:P、N:P 及叶 C:P、N:P 有极显著影响 ($P < 0.01$),对根 N:P 有显著影响 ($P < 0.05$)。降雨时间间隔对根、茎、叶 C:N、C:P、N:P 有极显著影响 ($P < 0.01$)。不同降雨格局白枪杆根、茎、叶 C:N 分别为 59.91~132.52、46.35~100.79、46.79~67.39; C:P 分别为 660.91~866.68、631.40~911.80、836.72~2351.75; N:P 分别为 6.56~11.53、9.08~14.55、14.50~40.58(图 3)。

与对照组相比,降雨量减少 40%、降雨时间间隔为 5 d 时,根 C:N、C:P 分别显著增加 43.30%、31.02% ($P < 0.05$);叶 C:N 显著增加 11.74% ($P < 0.05$)。降雨时间间隔为 10 d 时,根 C:N、C:P 分别显著增加 22.97%、9.01% ($P < 0.05$),N:P 显著减少 11.29% ($P < 0.05$);茎 C:P 显著增加 24.47% ($P < 0.05$);叶 C:N、C:P 分别显著增加 44.02%、



不同小写字母表示相同降雨时间不同降雨量间差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicated significant differences ($P < 0.05$) between different rainfall amounts at the same rainfall duration.

图3 降雨格局对白桉杆各器官中C、N、P质量分数及化学计量比的影响

Fig.3 Effects of rainfall patterns on mass fraction and stoichiometric ratios of C, N and P in organs of *F. malacophylla*

12.40% ($P < 0.05$), N:P 显著减少 21.89% ($P < 0.05$)。降雨量增加 40%、降雨时间间隔为 5 d 时, 根 C:N 显著减少 27.52% ($P < 0.05$), N:P 显著增加 58.96%

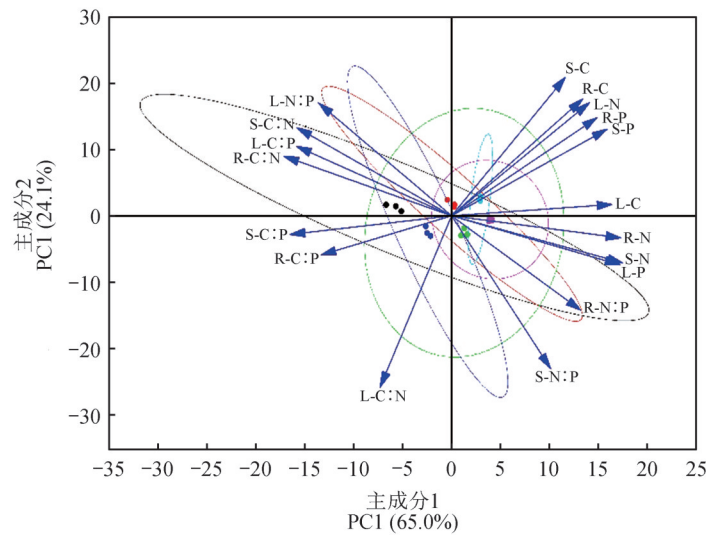
($P < 0.05$); 茎 C:N 显著减少 29.13% ($P < 0.05$), N:P 显著增加 43.93% ($P < 0.05$); 叶 C:N 显著增加 25.82% ($P < 0.05$)。降雨时间间隔为 10 d 时, 根 C:N

显著减少 23.57% ($P < 0.05$), N:P 显著增加 36.72% ($P < 0.05$); 茎 C:N 显著减少 21.16% ($P < 0.05$), N:P 显著增加 34.24% ($P < 0.05$); 叶 C:N 显著增加 16.61% ($P < 0.05$), C:P、N:P 分别显著减少 14.74%、26.87% ($P < 0.05$)。

2.3 白枪杆各器官 C、N、P 特征的主成分分析

对不同降雨格局下白枪杆幼苗各器官 C、N、P 特征参数进行主成分分析(图 4), 前 2 个主成分贡献率分别为 65.0%、24.1%, 累计贡献率共计 89.1%, 基本可以体现白枪杆幼苗的应对不同降雨格局的

响应特征。其中, 根 N、P 含量及 C:N, 茎和叶 C、N、P 含量及 C:N 均与主成分 1(PC1) 呈正相关, 且根 P 含量、茎 P 含量、茎 C:N、叶 N 含量、叶 C:N 对 PC1 贡献率较高; 根 N 含量、C:N、C:P, 茎 N 含量、C:N、C:P, 叶 N、P 含量及 N:P 均与主成分 2(PC2) 呈正相关, 根 N 含量、茎 N 含量、叶 P 含量的贡献率较高。综上, 根、茎、叶 N、P 含量及茎和叶 C:N 是白枪杆 C、N、P 化学计量特征的主要贡献者, 基本反映了白枪杆幼苗对不同降雨变化的响应特征。



R. 根; S. 茎; L. 叶; R-C、R-N、R-P 分别表示根 C、N、P 含量; R-C:N、R-C:P、R-N:P 分别表示根 C、N、P 化学计量比; S-C、S-N、S-P 分别表示茎 C、N、P 含量; S-C:N、S-C:P、S-N:P 分别表示茎 C、N、P 化学计量比; L-C、L-N、L-P 分别表示叶 C、N、P 含量; L-C:N、L-C:P、L-N:P 分别表示叶 C、N、P 化学计量比; 下同。

R. Root; S. Stem; L. Leaf; R-C, R-N, R-P represented the C, N, and P contents of roots, respectively; R-C:N, R-C:P, R-N:P represented the stoichiometric ratios of C, N, and P of roots, respectively; S-C, S-N, S-P represented the C, N, and P contents of stems, respectively; S-C:N, S-C:P, S-N:P represented the stoichiometric ratio of C, N, and P of stems, respectively; L-C, L-N, L-P represented the C, N, and P content of leaves; and L-C:N, L-C:P, and L-N:P represented the stoichiometric ratios of C, N, and P of leaves, respectively; the same as below.

图 4 白枪杆各器官中 C、N、P 特征的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of C, N and P characteristics in various organs of *F. malacophylla*

2.4 不同降雨格局下白枪杆幼苗各器官 C、N、P 含量及其比值的相关性

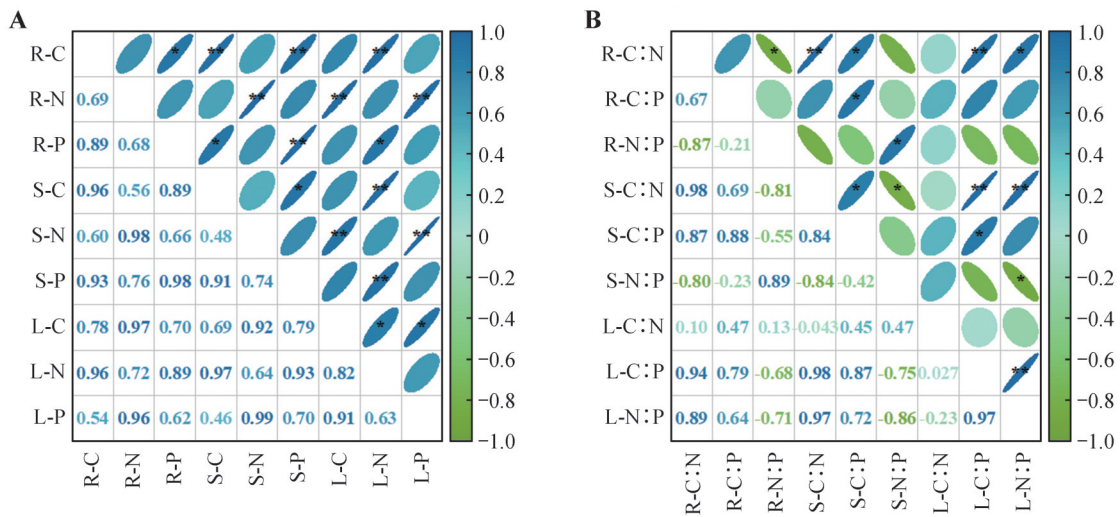
白枪杆幼苗 C、N、P 化学计量特征 36 个组对中, 有 34 对达到显著水平, 占比 94.4% (图 5)。白枪杆幼苗各器官 C、N、P 含量组对均呈正相关关系, 表明不同降雨格局背景下, 器官间的养分协同性与器官内部的养分协同性一致。不同器官化学计量比相关性分析表明, 在 36 个组对中, 有 26 对达到显著水平, 占比 72.2%。根与茎的化学计量比中有 5 对呈正相关, 3 对呈负相关; 根与叶中有 4 对呈正相关, 2 对呈负相关; 茎与叶中有 5 对呈正相

关, 2 对呈负相关; 根和茎的化学计量比中各有 1 对呈正相关, 1 对负相关, 叶中有 1 对呈正相关。由此说明, 在不同降雨格局下, 白枪杆器官间的化学计量比协同性略高于器官内。

3 讨论

3.1 白枪杆幼苗生物量对降雨格局变化的响应

生物量是植物生长过程中最直接的数量特征, 反映植物在生态系统中的物质生产量^[21]。植物生长发育受到水的限制, 环境变化时, 植物通过调节各器官生物量分配来维持自身正常生理



R. 根; S. 茎; L. 叶; C. 碳; N. 氮; P. 磷。绿色部分由深绿到浅绿代表负相关,蓝色部分由深蓝到浅蓝代表正相关,由绿色逐渐过渡为蓝色代表相关系数值相应变大。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

R. Root; S. Stem; L. Leaf; C. Carbon; N. Nitrogen; P. Phosphorus. The green part from dark green to light green represented a negative correlation, the blue part from dark blue to light blue represented a positive correlation, and the gradual transition from green to blue represented the correlation coefficients being larger accordingly. * $P < 0.05$, and ** $P < 0.01$.

图5 不同降雨格局下白枪杆幼苗各器官C、N、P含量(A)及其化学计量比(B)相关性

Fig.5 Correlations of C, N and P contents (A) and their stoichiometric ratios (B) in organs of *F. malacophylla* seedlings under different rainfall patterns

活动。

本研究发现,降雨量减少,植物各器官生物量减少,且降雨时间间隔延长会加剧这一影响(图1),这与胡雯等^[22]对益智(*Alpinia oxyphylla*)的研究结果一致。研究^[20]表明,当降雨量减少时,植物会通过增加根生物量来增强水分吸收能力。本研究显示,降雨时间间隔为5 d时,根生物量分配比增加,说明白枪杆通过增加根部生物量来提升对水分的获取能力,以应对短期内的缺水状况。最优分配理论^[21]认为,当可利用的水资源减少时,植物会减少对地上部(如茎和叶)的生物量分配,而将更多的生物量分配给根。然而,在降雨时间间隔达到10 d时,根生物量占总生物量的比例反而减少。杨林等^[23]对虎尾草(*Chloris virgata*)的研究表明,延长降雨时间间隔导致虎尾草根长、直径和表面积减少,说明降雨时间间隔延长也可能影响白枪杆根系的生长。这是因为,在相同降雨量条件下,延长降雨时间间隔会使土壤水分补充不足,从而抑制植物各器官生物量的积累^[4]。

此外,本研究还发现,当降雨量增加时,白枪杆的根、茎、叶生物量均有所增加,但根生物量的分配比例下降,叶生物量的分配比例提高(图1),

这表明在增加降雨量条件下,白枪杆的水分供应已经相对充足,因此,可以将更多的资源分配到地上部分。当土壤水分条件较好时,幼苗地上部分生长旺盛,从而增大幼苗获取光资源面积^[24]。李新乐等^[10]对白刺幼苗的研究也表明,白刺通过分配更多的光合产物促进地上部分生长来有效应对降雨量的增加,这有利于植株对环境资源的有效利用。

3.2 白枪杆C、N、P化学计量特征对不同降雨格局的响应

植物不同组织N、P含量变化反映植物对不同营养物质吸收和需求,以及对不同环境的适应能力^[4]。C是植物各器官、组织的构建元素,N、P是植物生长的限制元素^[25-26]。本研究发现,随着降雨量减少,白枪杆根、茎、叶的C、N、P含量均减少,且随着降雨时间间隔延长,这种影响愈加明显(图3)。王珊等^[27]研究也发现,降雨量减少会导致红砂(*Reaumuria songarica*)和珍珠(*Salsola passerina*)各器官C、N、P含量减少。这可能是由于当环境水分不足时,植物会关闭大部分气孔以减少水分蒸腾,导致光合作用减弱,C的固定能力下降;同时,植物N、P养分的吸收、分配、运输、储存等过程受

阻,导致 C、N、P 在植物体内的分布发生变化^[28]。本研究中,叶片 P 含量高于根和茎,这是因为叶片作为植物代谢活性较强的器官,对环境变化尤为敏感^[29]。为了维持叶片较高的生理生态活性,植物叶片通常要积累和贮存比茎和根更高的养分含量^[12]。本研究还发现,降雨量增加时,植物叶片 C、P 含量显著增加,而 N 含量则呈现下降趋势。这一现象可能是由于水分充足时,植物需要更多 P 来合成光合作用所需的酶,从而促进光能的转化和利用。Seligman 和 Sinclair^[30] 研究发现,降雨量减少时,植物通过增加叶片内部非光合组织 N 的投入,来提高细胞渗透压,增强对体内水分的保护作用,从而提高植物水分利用效率,适应少雨的环境。随着降雨量增加,植物不再需要大量 N 分配到叶片内部非光合组织中^[10],因此,白枪杆叶片 N 含量下降。

本研究中,白枪杆幼苗根、茎、叶 C 质量分数分别为 $(491.41 \pm 59.67) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(410.93 \pm 64.40) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(353.56 \pm 70.05) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,根 C 质量分数明显高于西南喀斯特地区乔木平均根系 C 质量分数 $((399.00 \pm 22.40) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ ^[31],叶片 C 质量分数明显低于西南喀斯特地区乔木平均叶 C 质量分数 $((431.35 \pm 32.38) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 。这表明,白枪杆更倾向于将 C 储存于根部,根部 C 质量分数较高,反映了其在面对环境压力时的适应机制。根部储存的 C 不仅起到结构支撑作用,还能提供缓冲功能^[26],以应对环境波动。本研究发现,白枪杆幼苗根、茎、叶 N 质量分数分别为 $(6.06 \pm 3.04) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(6.94 \pm 2.57) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(6.31 \pm 2.04) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,茎 N 质量分数明显高于西南喀斯特地区乔木平均茎 N 质量分数 $((1.43 \pm 0.61) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ ^[31],叶 N 质量分数明显低于西南喀斯特地区乔木平均叶 N 质量分数 $((16.14 \pm 3.42) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ ^[31]。根、茎、叶 P 质量分数分别为 $(0.69 \pm 0.16) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(0.58 \pm 0.18) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(0.33 \pm 0.18) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,根和茎 P 质量分数明显高于西南喀斯特地区乔木平均根和茎 P 质量分数 $((0.23 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(0.08 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$,叶 P 质量分数明显低于西南喀斯特地区乔木平均叶 P 质量分数 $((0.67 \pm 0.14) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ ^[31],且叶 N、P 质量分数均低于中国陆地植物叶片平均 N $(20.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 、P 质量分数 $(1.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})$ ^[32],反映出白枪杆叶 N、P 质量分数总体偏低的特性。作为活性器官,叶片通过调整自身营养水平,以保证植物实现最佳的

营养物质和能量分配^[6]。当外界环境发生变化时,这种机制使得树木能更好地满足自身生长发育的物质需求。

植物体内 C:N、C:P 直接反映了植物的 C 同化能力,C:N、C:P 越大,意味着 C 同化能力越强,这在一定程度上显示了植物营养物质吸收利用效率^[7]。研究^[33]表明,元素化学计量与植物生长速率相关性极强。生长速率理论认为,生长迅速的植物和新陈代谢快的器官 C:P 和 N:P 较低,且 P 含量相对较高^[34-35]。本研究中,根部 C:N 高于茎和叶,叶 C:P 高于根和茎(图 3),这可能与根系的主要功能密切相关,根系主要负责吸收水分和养分,代谢需要足够的 N,而叶片则主要进行光合作用,需要足够的 P 来合成所需的酶。

N:P 阈值假说^[36-37]认为,植物叶片 N:P 可以作为判断植物生产力受限制元素的指标。当 $N:P > 16$ 时,P 限制了植物生长;当 $N:P < 14$ 时,N 限制了植株生长;当 $14 \leq N:P \leq 16$ 时,N 和 P 共同限制了植物生长。本研究中,降雨量减少和自然降雨量条件下,白枪杆叶片 $N:P > 16$ (图 3),表明 P 限制了植物生长;降雨量增加条件下,白枪杆叶片 $N:P$ 为 14~16,表明 N 和 P 共同限制了植物生长。

3.3 白枪杆适应降雨变化的主要策略

植物组织中 C、N、P 含量及其化学计量比之间存在显著的相关性,这种相关性反映了植物体内营养元素间内在的耦合机制^[38]。本研究中,除白枪杆茎 C 含量与茎 N 含量和叶 P 含量无显著相关外,其余各器官 C、N、P 含量组对均呈正相关关系(图 5),表明白枪杆不同组织内 C、N、P 元素表现出很强的耦合关系^[39]。叶片与细根作为植物体地上部分和地下部分最活跃的器官,它们的许多性状存在密切联系^[40]。陈壹铭等^[38]对西北 21 种荒漠植物研究表明,叶片与细根间的 C:N、C:P 均表现出极显著的正相关关系。本研究中,白枪杆叶 C:P 与根 C:N、C:P 也表现出极显著的正相关关系,但叶 C:N 与根 C:N、C:P 相关性均不显著。这表明植物在完成正常的生命活动时,地上部分与地下部分的养分分配存在协同关系^[38],但这种协同性在植物之间表现出一定的差异,可能因为植物化学计量与温度、气候、土壤养分、光等非生物因素和遗传特征、所处的生长发育阶段、器官间差异、物种与种群间差异等生物因素有密切关系^[41]。

4 结论

本研究探讨了降雨量减少和降雨时间间隔延长对白枪杆生物量及其C、N、P化学计量特征的影响。研究表明,降雨量减少会导致白枪杆幼苗根、茎、叶生物量及C、N、P含量减少,且随着降雨时间间隔延长,这种影响愈加明显;降雨量增加时,白枪杆幼苗根、茎、叶生物量增加,叶片C、P含量显著增加。在降雨量减少和自然降雨量条件下,白枪杆叶片N:P>16,表明P是限制植物生长的主要因素;降雨量增加时,白枪杆叶片N:P为14~16,表明N和P共同限制了植物生长。因此,今后在白枪杆经营管理中应注重P肥的添加。

参 考 文 献

- [1] IPCC Secretariat. Climate change: a threat to human well-being and health of the planet [R]. IPCC, 2022: 1-5.
- [2] ADGER N, AGGARWAL P, AGRAWALA S, *et al.* Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability-working group II contribution to the intergovernmental panel on climate change fourth assessment report [R]. [S.l.]: IPCC, 2007: 1-13.
- [3] 王佳敏. 不同降雨时间格局下喀斯特异质性生境对桧楠幼苗生理生态和功能性状的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- WANG J M. Effects of karst heterogeneous habitats on the physiological and ecological and functional traits of *Phoebe zhennan* S. Lee seedlings under different rainfall temporal pattern [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [4] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典典型草原优势种大针茅幼苗的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1155-1164.
- ZHOU S X, WU D X, ZHANG L, *et al.* Effects of changing precipitation patterns on seedlings of *Stipa grandis*, a dominant plant of typical grassland of Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(10): 1155-1164.
- [5] 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 homeostasis 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.
- [6] MEUNIER C L, BOERSMA M, EL-SABA AWI R, *et al.* From elements to function: toward unifying ecological stoichiometry and trait-based ecology [J]. Frontiers in Environmental Science, 2017, 5: 18.
- [7] QIN H J, JIAO L, ZHOU Y, *et al.* Elevation affects the ecological stoichiometry of Qinghai spruce in the Qilian Mountains of northwest China [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 917755.
- [8] ZHENG X F, GAO P X, ZHANG S X. The distribution shifts of *Pinus armandii* and its response to temperature and precipitation in China [J]. PeerJ, 2017, 5: e3807.
- [9] 余道, 刘子琦, 喻阳华, 等. 黔西南石漠化区不同群落土壤碳氮磷垂直分异及化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2021, 34(10): 2231-2239.
- YU X, LIU Z Q, YU Y H, *et al.* Vertical differentiation and stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different communities of southwest Guizhou desertification area [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(10): 2231-2239.
- [10] 李新乐, 李永华, 董雪, 等. 模拟增雨对白刺和油蒿幼苗化学计量特征的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(4): 688-696.
- LI X L, LI Y H, DONG X, *et al.* Effect of simulated precipitation addition on stoichiometric characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedling [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(4): 688-696.
- [11] 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.
- [12] 董雪, 许德浩, 韩春霞, 等. 天然沙冬青器官生态化学计量特征对异质生境的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 858-869.
- DONG X, XU D H, HAN C X, *et al.* Responses of ecological stoichiometric characteristics in organs of *Ammopiptanthus mongolicus* to heterogeneous habitats [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 858-869.
- [13] 黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 等. 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤C、N、P化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5362-5373.
- HUANG J Y, YU H L, LIU J L, *et al.* Effects of precipitation levels on the C: N: P stoichiometry in plants, microbes, and soils in a desert steppe in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5362-5373.
- [14] 茶晓飞, 董琼, 段华超, 等. 干旱下白枪杆幼苗生物量及生理活性物质对钙添加的适应性调节[J]. 西北林

- 学院学报, 2023, 38(3):10-17.
- CHA X F, DONG Q, DUAN H C, *et al.* Adaptive regulation of biomass and physiologically active substances in response to calcium addition in *Fraxinus malacophylla* seedlings under drought[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(3): 10-17.
- [15] 段华超. 石漠化地区乡土树种白枪杆幼苗干旱和钙适应性研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2021.
- DUAN H C. Research on the drought and calcium adaptability of native tree species *Fraxinus malacophylla* seedlings in rocky desertification area [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2021.
- [16] XU L L, QIAN S, ZHAO X L, *et al.* Spatio-temporal variation of vegetation ecological quality and its response to climate change in rocky desertification areas in southwest China during 2000 - 2020[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(1): 27-33.
- [17] 段燕楠, 王占良, 王顺金. 基于降雨的昆明水库蓄水模式分析及风险研究[J]. 云南地理环境研究, 2019, 31(2): 13-19.
- DUAN Y N, WANG Z L, WANG S J. Analysis and risk study on water storage model of Kunming reservoir based on rainfall [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2019, 31(2): 13-19.
- [18] 韦兴兰, 茶晓飞, 罗润文, 等. 白枪杆幼苗生长及根系形态特征对旱季模拟不同降水变化的响应[J]. 林草资源研究, 2024 (4): 103-112.
- WEI X L, CHA X F, LOU R W, *et al.* Response of *Fraxinus malacophylla* seedling growth and root morphological characteristics to simulated variations in precipitation during the dry season[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024 (4): 103-112.
- [19] 刘明翰. 基于无有效降水指数的西南地区干旱时空特征分析[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2020.
- LIU M H. Spatial-temporal analysis of drought in southwest China based on no effective precipitation index[D]. Nanning: Nanning Normal University, 2020.
- [20] 韦兴兰, 孙丽娟, 郭焕仙, 等. 旱季降雨变化对树番茄苗木生长及化学计量特征影响的模拟研究[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2024, 53(6): 825-832.
- WEI X L, SUN L J, GUO H X, *et al.* Effect of simulated dry season rainfall variation on growth and stoichiometric characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 53(6): 825-832.
- [21] POORTER H, NIKLAS K J, REICH P B, *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. New Phytologist, 2012, 193(1): 30-50.
- [22] 胡雯, 周小慧, 李勤奋, 等. 旱季降雨格局变化对益智生长和碳氮代谢的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(12): 2597-2605.
- HU W, ZHOU X H, LI Q F, *et al.* Effects of precipitation pattern change on the growth carbon and nitrogen metabolism of *Alpinia oxyphylla* during dry season[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(12): 2597-2605.
- [23] 杨林, 陈默, 李海燕, 等. 模拟降雨格局变化对虎尾草分株和根系特征的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 181-188.
- YANG L, CHEN M, LI H Y, *et al.* Effect of simulated changes in rainfall patterns on characteristics of ramets and roots of *Chloris virgata* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1): 181-188.
- [24] 孙洪刚, 刘军, 董汝湘, 等. 水分胁迫对毛红椿幼苗生长和生物量分配的影响[J]. 林业科学研究, 2014, 27(3): 381-387.
- SUN H G, LIU J, DONG R X, *et al.* Effects of water stress on seedling growth and biomass allocation of *Toona ciliata* var. *pubescens* [J]. Forest Research, 2014, 27(3): 381-387.
- [25] 蔡年辉, 唐军荣, 车凤仙, 等. 云南松苗木碳氮磷化学计量特征的构件效应[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(2): 35-42.
- CAI N H, TANG J R, CHE F X, *et al.* Effects of stumping treatments on C, N, and P stoichiometry in different organs of *Pinus yunnanensis* Franch [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(2): 35-42.
- [26] PAN Y D, BIRDSEY R A, FANG J Y, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 2011, 333(6045): 988-993.
- [27] 王珊, 单立山, 李毅, 等. 降水变化对红砂-珍珠碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(2): 335-344.
- WANG S, SHAN L S, LI Y, *et al.* Effect of precipitation on the stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(2): 335-344.
- [28] HE M Z, DIJKSTRA F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis [J]. New Phytologist, 2014, 204(4): 924-931.
- [29] SCHREEG L A, SANTIAGO L S, WRIGHT S J, *et al.* Stem, root, and older leaf N:P ratios are more responsive indicators of soil nutrient availability than new foliage [J]. Ecology, 2014, 95(8): 2062-2068.
- [30] SELIGMAN N G, SINCLAIR T R. Global environment

- change and simulated forage quality of wheat II. water and nitrogen stress [J]. *Field Crops Research*, 1995, 40(1):29-37.
- [31] 刘立斌, 钟巧连, 倪健. 贵州高原型喀斯特次生林 C、N、P 生态化学计量特征与储量[J]. *生态学报*, 2019, 39(22):8606-8614.
- LIU L B, ZHONG Q L, NI J. Ecosystem C:N:P stoichiometry and storages of a secondary plateau-surface karst forest in Guizhou Province, southwestern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(22):8606-8614.
- [32] 王亚飞, 杨红青, 周欧, 等. 水氮耦合下高密度毛白杨纸浆林树木各器官化学计量特征[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(12):68-79.
- WANG Y F, YANG H Q, ZHOU O, *et al.* Chemical stoichiometry characteristics of various organs of trees in high-density *Populus tomentosa* pulp forests under water-nitrogen coupling[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(12):68-79.
- [33] ÅGREN G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(3):185-191.
- [34] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry: biology of elements from molecules to the biosphere [J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(9):1183.
- [35] NIKLAS K J, COBB E D. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth[J]. *American Journal of Botany*, 2005, 92(8):1256-1263.
- [36] PEREZ-HARGUINDEGUY N, DÍAZ S, GARNIER E, *et al.* New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Australian Journal of Botany*, 2013, 61(3):167-234.
- [37] OLDE VENTERINK H, WASSEN M J, VERKROOST A W M, *et al.* Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands [J]. *Ecology*, 2003, 84(8):2191-2199.
- [38] 陈壹铭, 单立山, 马静, 等. 西北干旱区荒漠植物叶片和细根碳、氮、磷化学计量特征[J]. *生态学报*, 2024, 44(9):3648-3659.
- CHEN Y M, SHAN L S, MA J, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in leaves and fine roots of desert plants in arid region of northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9):3648-3659.
- [39] 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 等. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(11):1138-1153.
- XIONG X S, CAI H Y, LI Y Q, *et al.* Seasonal dynamics of leaf C, N and P stoichiometry in plants of typical steppe in Nei Mongol, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(11):1138-1153.
- [40] REICH P B. The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(2):275-301.
- [41] 刘超, 王洋, 王楠, 等. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(11):1205-1216.
- LIU C, WANG Y, WANG N, *et al.* Advances research in plant nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in terrestrial ecosystems: a review [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(11):1205-1216.