

甘南白龙江 2 种次生林不同器官 C、N、P、K 计量特征

霍怀成^{1,2}, 曹秀文^{1,2}, 刘锦乾^{1,2*}, 王 飞^{1,2}, 齐 瑞^{1,2}, 赵 阳^{1,2}, 张 涛^{1,2},
陈学龙^{1,2}, 王若鉴^{1,2}, 要 静^{1,2}

(1. 甘肃省白龙江林业管理局 林业科学研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 舟曲 746300)

摘 要:为明确甘南白龙江 2 种次生林各器官 C、N、P、K 生态化学计量特征,掌握养分元素在不同次生林分配格局及各器官养分受限状况等情况,对该地区红桦和辽东栎 2 种主要次生林各器官(根、主干、各级枝、叶片)进行取样,分析其含水率、C、N、P 和 K 含量以及各元素之间化学计量特征,结果表明:1)2 种次生林叶片含水率最大,红桦各器官含水率在 34.09%~59.01%,从大到小依次为叶片>一级枝>根>二级枝>三级枝,辽东栎各器官含水率在 33.98%~52.66%,叶片>根>一级枝>二级枝>三级枝>四级枝,叶片含水率均最高,其次为根,枝级越高含水率越小。2)2 种次生林叶片的 C、N、P、K 含量最高。辽东栎 C 含量在 387.19~529.64 g·kg⁻¹,叶片 C 含量最高,其他各器官含量相差不大,C 属于弱变异。N 含量在 5.03~19.54 g·kg⁻¹,从大到小依次是叶片>三级枝>四级枝>根>二级枝>一级枝>主干。叶片 P 和 K 含量也是最高,除根的 K 含量以外,其他器官都表现出 2 种元素含量从形态学的下端到上端依次增加。N 与 K 含量呈显著性相关,P 变异系数较大,属于强变异。红桦 C、P 和 K 变化一致,除根以外,从主干到叶片 3 种元素含量依次增加,P 含量从根到叶片依次增加,C 变异系数最小属于弱变异,K 含量属于强变异。3)2 种次生林叶片的 C:N、C:P、C:K 和 P:K 最小,N:P 最大。红桦叶片的 N:K 也是最小,C:N 与 N:K 呈显著性负相关,C:P 与 N:P 以及 C:K 与 N:K 呈显著性正相关。辽东栎的 N:K 除叶片,从根到四级枝依次减小,C:P 与 N:P 呈显著性正相关,C:K 与 N:K 和 P:K 也呈显著性正相关。由此可见,甘南白龙江 2 种次生林各器官营养元素含量与相应器官的功能结构密切相关。

关键词:生态化学计量特征;辽东栎;红桦;甘南白龙江;植物器官

中图分类号:S714.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0064-09

Stoichiometric Characteristics of C,N,P,and K in Different Organs of Two Secondary Forests in Bailongjiang,Gannan

HUO Huai-cheng^{1,2}, CAO Xiu-wen^{1,2}, LIU Jin-qian^{1,2*}, WANG Fei^{1,2}, QI Rui^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2},
ZHANG Tao^{1,2}, CHEN Xue-long^{1,2}, WANG Ruo-jian^{1,2}, YAO Jing^{1,2}

(1. Institute of Forestry Science, Bailongjiang Forestry Management Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Gansu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu 746300, Gansu, China)

Abstract: The objectives of this study were to clarify the ecochemical characteristics of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in the organs of the two secondary forests (*Betula albosinensis* and *Quercus wutaishanica*) occurring in the reaches of the Bailongjiang River in Gannan, and to master the distribution pattern of nutrient elements in different secondary forests and the nutrient limitation status of each organ. Samples were collected from different organs (root, trunk, branch and leaf) of the two species.

收稿日期:2021-07-16 修回日期:2021-09-26

基金项目:甘肃省 2019 年林业科技创新与国际合作项目;甘肃省林业科技项目(2015kj045,2016kj058)。

第一作者:霍怀成,工程师。研究方向:森林生态。E-mail:173763825@qq.com

* 通信作者:刘锦乾,正高级工程师。研究方向:林业土壤。E-mail:1336190642@qq.com

The contents of water, organic C, total N, total P, and total K were measured. The stoichiometric characteristics of each element was analyzed. The results showed that 1) among different organs of the two species, the highest moisture content was found in the leaf. The moisture contents in different organs of *B. albosinensis* ranged from 34.09% to 59.01% and with the order of leaf > primary branch > secondary branch > tertiary branch; for *Q. wutaishanica*, the order was leaf > root > primary branch > secondary branch > tertiary branch > fourth branch, ranged from 33.98% to 52.66%. 2) The contents of C, N, P, and K in the leaves of two species were the highest. The content of organic C in *Q. wutaishanica* was between 387.19–529.64 g · kg⁻¹. The content of organic C in the leaf was the highest, there was no significant difference in carbon content among other organs, carbon belonged to weak variation. The content of total N was between 5.03–19.54 g · kg⁻¹ with the order of leaf > tertiary branch > tertiary branch > root > secondary branch > primary branch > trunk. The contents of total P and K in the leaf were also the highest. Except for total K in root, the contents of K and P increased from the lower end to the upper end of the morphology. There existed a significant correlation between total N and total K contents, and the coefficient of variation of total P was large, P belonged to strong variation. The variations of C, P, and K in *B. albosinensis* were in the same trends, except for the root, the contents of the three elements increased from the trunk to the leaf, while the content of P increased from the root to the leaf. Carbon belonged to weak variation, and the total potassium belonged to strong variation. 3) In the leaves of the two species, the ratios of C : N, C : P, C : K and P : K were the smallest, and the and N : P was the largest. The ratio of N : K of *B. albosinensis* leaf was also the smallest, the ratios of C : N and N : K were significantly and negatively correlated, significant correlations were found between the ratios of C : P and N : P, as well as C : K and N : K. Except for the leaf, the ratio of N : K of *Q. wutaishanica* decreased from root to quaternary branch, the ratios of C : P and N : P were significantly and positively correlated, C : K was also significantly and positively related to N : K and P : K. It can be seen that the contents of nutrient elements in the organs of the two secondary forests in the reaches of the Bailong River in Gannan are closely related to the functional structure of the corresponding organs.

Key words: ecological stoichiometry; *Quercus wutaishanica*; *Betula albosinensis*; Gannan Bailong River; plant organ

生态化学计量学是综合生物学、化学和物理学的基本原理,研究多种化学物质在生态系统相互作用和过程中平衡的科学^[1-2]。碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)是地球生物圈基本生物组成元素,其化学计量特征是生物对环境的生态适应性、N、P利用效率和养分限制以及生态系统稳定性的基础^[3-4],与植物的生长速率、生产力、群落多样性^[5]和凋落物分解速率^[6]等具有重要关系^[7];研究植物体不同部位化学元素组成与流动体现出植物体不同部位对养分的需求,特别是C、N、P的含量及其比率关系,有助于了解植物的生长发育过程、群落的结构和功能等^[8-9],植物叶片C : N、C : P代表了植物对N、P元素的吸收利用能力^[10],N : P是植物N、P限制特征的关键指标^[8,11],因此植物化学计量特征不仅指示了不同部位对养分的需求也指示了其所在生态系统C元素的蓄积动态和N、P元素的循环速率^[12],K是所有生物必需的营养元素,是多种酶的活化剂,在代谢过程中起着重要作用,不仅可促进光合作用,还可以

促进N代谢,提高植物对N的吸收和利用,增强植物的抗逆性,在植物体的各种生理与生物化学过程中起着重要作用^[13]。

近年来我国学者开展了对不同群落类型植物叶片、凋落物及土壤C、N、P化学计量特征的研究工作^[14-17]。蒋龙等^[7]对我国亚热带常绿森林生态系统土壤和植物叶片研究表明,土壤C、N、P的含量原始林最高,人工林最低,但是人工林土壤C : N最高,次生林土壤C : P最高,原始林土壤N : P最高,乔木叶片C、N、P含量最高,草本植物最低。赵耀等^[14]对同一森林类型下不同森林群落优势树种的叶片、凋落物、土壤C、N、P含量研究呈差异显著,土壤C、N、P含量及C : N、C : P受纬度与海拔显著影响。王晶苑等^[18]对中国4种优势树种的化学计量特征研究表明,常绿植物叶片的N、P高于落叶植物,而叶片C : P与森林类型的关系并不十分密切,这种差异可能是由不同研究区域的环境条件差异导致的^[15]。随着海拔的变化,环境因子也随之变

化^[19],主要因子影响植物资源的获取能力、机械稳定性水平、竞争优势等植物生长发育过程^[20-21]。

次生林是原始林经过干扰后形成的森林,是中国森林资源的重要组成部分和基地^[22]。白龙江林区是全国九大重点林区之一,位于甘肃南部接壤四川、青海和陕西^[23],是中国主要次生林分布区,也是甘肃森林资源的重要组成部分,在碳循环中有着重要作用,也是涵养水源、水土保持、调节气候及农业生产的屏障作用。近年来对不同森林群落树种的叶片、凋落物、土壤 C、N、P 化学计量特征研究较多^[10,12,14-15],但是对同一地区不同优势次生林各器官化学计量特征的研究相对较少。本研究以甘肃南部主要次生林红桦(*Betula albosinensis*)和辽东栎(*Quercus wutaishanica*)为研究对象,主要对 2 种次生林不同器官的生态化学计量指标进行测定,分析 C、N、P、K 含量和比率的格局,以期揭示该地区植物的生理特征,为后续的理论研究和实践工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区设在甘肃南部白龙江流域,地处青藏高原、黄土高原、秦巴山地和四川盆地的交汇区,地理位置独特,森林资源丰富^[24],森林自然分布具明显垂直带谱,从下到上依次为针阔混交林,箭竹针叶林,杜鹃冷杉林,高山灌丛及高山草甸,其位于 102°

46′—104°52′E,33°04′—35°09′N 属于典型的西南高山地形,温度、降水具有明显的垂直分布和水平差异^[25]。成土母质为坡积母质,土层厚度在 1 m 以下,表层石砾含量少。全年平均气温 1.3°,年降水量 1 048 mm,全年降水量集中在 5—10 月。年平均空气相对湿度 80%,无霜期 80~103 d^[26]。

1.2 样地布设与样品采集

野外调查主要集中在 2019 年 7 月进行。在研究区内选取植被分布均匀,区域代表性较强的红桦和辽东栎 2 种天然次生林样地,各设置 9 个大小为 20 m×20 m 的样方,记录样方地形、地貌等因子,2 种次生林群落环境特征与优势种组成见表 1。对选定样方内 DBH≥3 cm 的乔木进行每木检尺并挂牌编码,记录种名、测量树高、胸径和冠幅等;在乔木样方四角和中心位置设置 5 个 5 m×5 m 的灌木调查样方,记录灌木种名、测量地径、株高和冠幅等。在灌木样方四角和中心位置设置 5 个 1 m×1 m 的草本调查样方,记录草本种名、株高、丛数和盖度等。在每个样方中选取 3 株长势良好没有病虫害的次生林为标准木,在每个标准木主干上选取标准侧枝为一级枝,采集所有叶片,一级枝的侧枝为二级枝,二级枝的侧枝为三级枝,依次类推,最后将各级枝条和所有叶片混合均匀,取部分枝和叶片称重分别装入大信封,最后采集部分标准木的根洗净晾干,分别称重带回实验室做化学分析。

表 1 2 种次生林群落环境特征与优势种组成

Table 1 Two community environmental characteristics and dominant species composition of secondary forest species

| 群落类型 | 海拔/m | 坡度/(°) | 郁闭度(%) | 优势种 |
|------|-----------------|------------|-----------|---|
| 红桦 | 2 549.33±121.76 | 27.38±5.88 | 0.76±0.13 | 白桦(<i>Betula platyphylla</i>)、山杨(<i>Populus davidiana</i>)、辽东栎(<i>Quercus wutaishanica</i>)、落叶松(<i>Larix</i> sp.)、油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>) |
| 辽东栎 | 2 306.78±99.43 | 23.78±4.23 | 0.78±0.09 | 刺叶高山栎(<i>Quercus spinosa</i> .)、北京丁香(<i>Syringa pekinensis</i> .)、枫杨(<i>Pterocarya stenoptera</i>)、青扦(<i>Picea wilsonii</i>) |

1.3 样品处理和测定

将带回实验室的植物样品置于 85 °C 烘箱烘干至恒重^[14],用粉碎机粉碎后过 100 目筛,密封以测 C、N、P、K。C 含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定,凯氏定氮法测定 N 含量,硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗分光光度法测定 P 含量,硫酸-双氧水消煮-火焰光度法测定 K 含量^[14],变异系数(CV)是反映数据离散程度的绝对值,0≤CV<15 为弱变异,15≤CV<35 为中等变异,CV≥35 为强变异。

1.4 数据处理

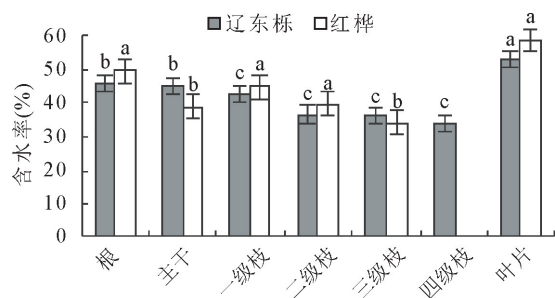
利用 SPSS21.0 和 Microsoft Excel 软件进行数据分析和作图。

2 结果与分析

2.1 2 种次生林不同枝级、根和叶片含水率

植物体内水分是影响植物光合作用、呼吸作用、生物量及其他生理生化指标的主要因素之一^[27],植物水分反映出植物体的生长状况。2 种次生林不同器官含水率如图 1。2 种次生林叶片含水率最大,其次为根;辽东栎含水率从大到小依次是叶片>根>主干>一级枝>二级枝>三级枝>四级枝,除了叶片以外,其他部位都表现出从生理学上端到末端含水率依次降低,叶片与根呈显著性差异($P<0.05$);红桦主干含水率较小,且没有四级枝,其他不同枝级也表现出从生理学上端到末端含水率依次降低,叶

片与三级枝呈显著性差异($P<0.05$)。红桦叶片、根、一级枝和二级枝含水率大于辽东栎,但是三级枝和主干小于辽东栎,主要可能是红桦为落叶阔叶树种,叶片膜质;辽东栎根含水率小于红桦,但是主干辽东栎含水率大于红桦,水分从根部到主干辽东栎运输能力强于红桦,但是不同枝级桦木含水率大于辽东栎,可能是因为水分运输过程辽东栎消耗较大。



注:小写字母表示 $P<0.05$ 显著差异。下同。

图 1 2 种次生林不同枝级、叶片和根含水率

Fig. 1 Moisture contents in the branches, leaves and roots of two species of secondary forests

2.2 2 种次生林不同器官化学计量特征的变异系数

2 种次生林不同器官化学计量特征的变异系数相差较大。由表 2 可知,辽东栎叶片 C、N、P、K 含量最高,C 含量在 $500.26\sim546.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,N 含量在 $12.54\sim23.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,P 含量在 $1.16\sim1.94\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,K 含量在 $27.81\sim53.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;根、主干和不同枝级的 C、P 含量变化不大,叶片 K 含量最高

($41.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次为四级枝 K 含量最高($23.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其他器官 K 含量变化不大。辽东栎不同器官 C 的变异系数最小,属于弱变异;主干和一级枝 N 的变异系数分别为 8.69% 和 7.92% 属于弱变异,其他属于中等变异;P 的变异系数在 $14.50\%\sim46.07\%$,叶片的变异系数为 14.50% 属于弱变异,根的变异系数为 46.07% 属于强变异,其他属于中等变异;P 的变异系数在 $8.17\%\sim22.78\%$,四级枝的变异系数最小为 8.17% 属于弱变异,其他器官 K 含量属于中等变异。

由表 3 可知,红桦不同器官化学计量特征和变异系数差异较大。2 种次生林叶片的 C、N、P 和 K 含量都最大,红桦 C 含量在 $506.05\sim544.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,N 含量在 $20.84\sim25.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,P 含量在 $1.53\sim2.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,K 含量在 $35.14\sim75.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;红桦 C 和 K 含量小于主干,其他器官不同部位 C、N、P、K 含量均表现出在生理学上端到下端依次增加。红桦 C 含量变异系数变化最小在 $2.45\sim5.57$,属于弱变异;N 含量变异系数变化较大在 $6.41\%\sim35.82\%$,叶片最小表现出弱变异,主干最高为强变异,其他器官都是中等变异;P 含量变异系数变化在 $12.37\%\sim38.24\%$,一级枝表现为弱变异,主干和二级枝表现为强变异,其他均表现出中等变异;K 含量变异系数变化在 $15.44\%\sim41.87\%$,主干表现为强变异,其他器官均表现出中等变异。

表 2 辽东栎不同枝级、根和叶化学计量特征与变异系数

Table 2 Stoichiometric characteristics and variation coefficients of the leaf, branch, and root of *Q. wutaishansea* Mary secondary forest $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 参数 | C 含量 | | | | N 含量 | | | | P 含量 | | | | K 含量 | | | |
|-----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Max | Min | Mean | CV(%) | Max | Min | Mean | CV(%) | Max | Min | Mean | CV(%) | Max | Min | Mean | CV(%) |
| 根 | 423.24 | 389.92 | 403.81 | 2.59 | 7.68 | 4.51 | 5.96 | 18.13 | 0.94 | 0.31 | 0.63 | 46.07 | 16.02 | 8.51 | 12.03 | 21.31 |
| 主干 | 410.99 | 389.56 | 400.27 | 3.79 | 5.48 | 4.84 | 5.15 | 8.69 | 0.73 | 0.72 | 0.73 | 17.17 | 12.84 | 10.29 | 11.56 | 15.60 |
| 一级枝 | 417.76 | 376.21 | 394.77 | 3.40 | 5.23 | 4.41 | 5.04 | 7.92 | 1.03 | 0.58 | 0.82 | 15.63 | 14.66 | 7.89 | 11.65 | 22.78 |
| 二级枝 | 417.18 | 367.80 | 394.43 | 3.45 | 7.10 | 4.52 | 5.64 | 14.13 | 2.02 | 0.68 | 1.12 | 35.59 | 16.30 | 9.81 | 12.49 | 16.36 |
| 三级枝 | 425.09 | 388.18 | 393.15 | 3.25 | 8.25 | 5.40 | 7.00 | 11.80 | 1.28 | 0.64 | 1.19 | 21.25 | 24.17 | 13.66 | 16.70 | 19.39 |
| 四级枝 | 397.93 | 376.87 | 387.19 | 2.37 | 8.93 | 5.98 | 6.94 | 19.40 | 1.71 | 0.93 | 1.25 | 28.99 | 25.08 | 16.20 | 23.31 | 8.17 |
| 叶 | 546.64 | 500.26 | 529.64 | 2.79 | 23.03 | 12.54 | 19.54 | 19.11 | 1.94 | 1.16 | 1.74 | 14.50 | 53.73 | 27.81 | 41.35 | 22.30 |

表 3 红桦不同枝级、根和叶化学计量特征与变异系数

Table 3 Stoichiometric characteristics and variation coefficients of the leaf, branch, and root of *B. albosinensis* $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 参数 | C 含量 | | | | N 含量 | | | | P 含量 | | | | K 含量 | | | |
|-----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Max | Min | Mean | CV(%) | Max | Min | Mean | CV(%) | Max | Min | Mean | CV(%) | Max | Min | Mean | CV(%) |
| 根 | 425.34 | 367.12 | 399.62 | 5.57 | 8.62 | 4.21 | 6.43 | 22.17 | 0.88 | 0.52 | 0.68 | 19.56 | 12.71 | 7.28 | 10.11 | 16.57 |
| 主干 | 399.96 | 366.02 | 383.22 | 3.38 | 6.44 | 3.67 | 6.32 | 35.82 | 0.96 | 0.49 | 0.81 | 35.78 | 12.24 | 6.29 | 9.87 | 41.87 |
| 一级枝 | 420.12 | 369.15 | 402.73 | 4.54 | 7.83 | 4.32 | 6.39 | 20.08 | 0.96 | 0.68 | 0.82 | 12.37 | 10.91 | 7.39 | 9.93 | 15.44 |
| 二级枝 | 425.63 | 385.52 | 408.19 | 3.85 | 8.99 | 5.03 | 6.64 | 24.50 | 1.18 | 0.51 | 0.94 | 38.24 | 15.66 | 7.91 | 10.69 | 23.61 |
| 三级枝 | 425.87 | 386.68 | 408.68 | 4.19 | 9.90 | 6.22 | 7.79 | 17.21 | 1.33 | 0.96 | 1.16 | 13.44 | 21.62 | 10.28 | 15.48 | 24.49 |
| 叶 | 544.72 | 506.05 | 526.34 | 2.45 | 25.86 | 20.84 | 23.61 | 6.41 | 2.34 | 1.53 | 1.83 | 16.21 | 75.14 | 35.14 | 51.50 | 25.16 |

通过表 2 和表 3 次生林不同器官化学计量特征和变异系数的比较,叶片的 C、N、P、K 含量都最高,主干最小,除根以外,2 种次生林的 C、N、P 和 K 含量在生理学上端到末端有依次增加的趋势;2 种次生林不同器官 C 含量最大,P 含量最小,C 含量都表现出弱变异;2 种次生林叶的 C 相差不大,辽东栎和红桦 C 分别为 $529.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $526.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,红桦的不同枝级和叶片 C、N、P 含量都大于辽东栎;辽东栎根的 C 和 K 含量大于红桦,不同枝级,根和叶片 K 含量辽东栎大于红桦,K 含量是抗逆性的表征,含量高抗逆性强,2 种次生林辽东栎抗逆性强于红桦。

2.3 2 种次生林不同器官生态化学计量特征

2 种次生林不同器官 C、N、P、K 化学计量比差别较大(图 2)。辽东栎和红桦的 C:N 分别在 $22.30 \sim 70.73$ 和 $27.10 \sim 78.37$,除根以外,其他器官 C:N 从生理学上端到末端表现出先增大后减小的趋势,即一级枝最大,叶片最小,但是同一植物器官 C:N 辽东栎大于红桦,辽东栎从一级枝开始逐渐减小,且与三级枝呈显著性相关($P < 0.05$),红桦

各器官间 C:N 均不显著。红桦和辽东栎从根到叶片 C:P 比依次减小,无显著性相关,但是辽东栎三级枝 C:P 大于二级枝和四级枝。红桦一级枝和二级枝 C:P 大于辽东栎,其余都小于辽东栎。2 种次生林 C:K 和 C:N 变化一致,都表现出先增加后减小的趋势,且都是一级枝 C:K 最大,叶片最小,随着 C:K 的减小红桦并无表现出显著性相关,辽东栎一级枝和二级枝表现出显著性相关($P < 0.05$),辽东栎和红桦 2 种次生林 C:K 变化范围在 $12.81 \sim 35.72$ 和 $10.22 \sim 35.72$,红桦叶片 C:K 小于辽东栎,其他都是红桦大于辽东栎。2 种次生林 N:P 从生理学上端到末端表现出先减小后增大的趋势,叶片的 N:P 最大,辽东栎随着 N:P 的减小表现出相关性不显著,红桦叶片与根以及根与主干的 N:P 都呈现出显著性相关($P < 0.05$),辽东栎和红桦 2 种次生林 N:P 变化范围分别是 $5.02 \sim 11.25$ 、 $6.83 \sim 12.91$,辽东栎根和三级枝 N:P 小于红桦。2 种次生林不同枝级、叶片和根 N:K 变化不大,呈现出相关性不显著,辽东栎叶片 N:K 大于

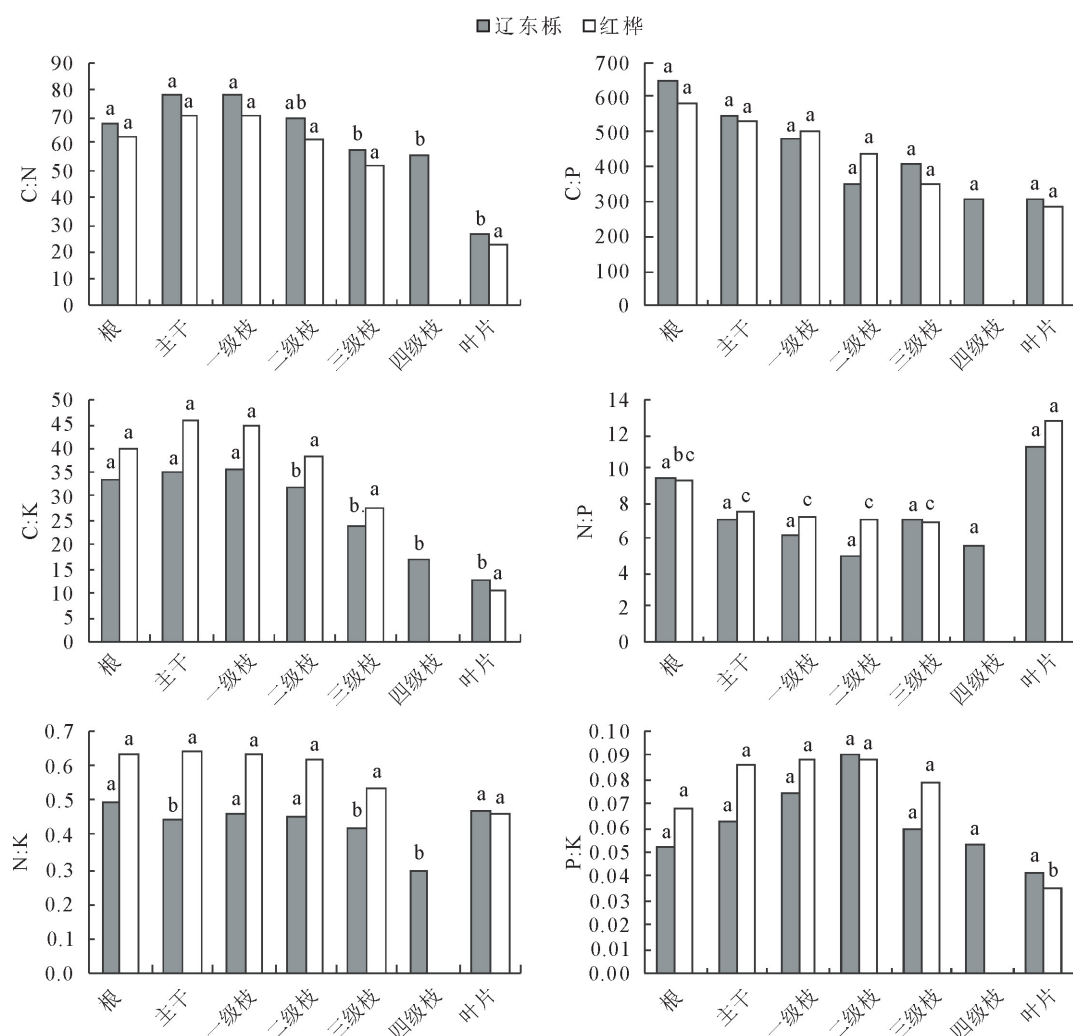


图 2 2 种次生林不同枝级、叶片和根化学计量比

Fig. 2 Stoichiometric ratios of the branches with different ranks, leaves and roots of two species

红桦,其他都是红桦大于辽东栎,N : K 变化范围分别是 0.29~0.49、0.45~0.64。2 种次生林不同枝级、叶片和根 P : K 从植物生理学上端到下端表现出先增大后减小的趋势,叶片最小,二级枝最大,红桦二级枝与叶片 P : K 呈显著性相关($P < 0.05$),其他都呈相关性不显著,辽东栎和红桦次生林 P : K 变化范围分别是 0.04~0.09、0.05~0.09,红桦叶片和二级枝 P : K 小于辽东栎,其他都是辽东栎大于红桦。

2 种次生林不同枝级、根和叶片 C : P 值最大,P : K 值最小;叶片的 N : P 都最大,叶片的 C : N、

C : P、C : K、和 P : K 都最小。

2.4 2 种次生林含水率和化学计量特征与计量比相关性

对 2 种次生林含水率、C、N、P、K 和化学计量比进行相关性分析(表 4),辽东栎 C 含量与 C : P 呈显著性正相关($P < 0.05$),N 含量与 P : K 呈显著性负相关($P < 0.01$),P 含量与 C : P 和 N : P 在 $P < 0.01$ 水平上呈显著性负相关,C : P 与 P : K 在 $P < 0.01$ 水平上呈显著性正相关,与 P : K 在 $P < 0.05$ 水平上呈显著性正相关,N : P 与 P : K 呈显著性正相关($P < 0.05$),其他指标之间相关性均不显著。

表 4 辽东栎化学计量特征与化学计量比的相关性

Table 4 Correlationships of stoichiometric characteristics and stoichiometric ratio of *Q. wutaishanica*

| 参数 | 含水率 | C | N | P | K | C : N | C : P | C : K | N : P | N : K | P : K |
|-------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|-------|
| 含水率 | 1 | | | | | | | | | | |
| C | 0.345 | 1 | | | | | | | | | |
| N | 0.610 | 0.646 | 1 | | | | | | | | |
| P | -0.379 | -0.636 | -0.260 | 1 | | | | | | | |
| K | 0.395 | 0.021 | 0.712* | 0.173 | 1 | | | | | | |
| C : N | -0.344 | 0.382 | -0.041 | 0.135 | -0.240 | 1 | | | | | |
| C : P | 0.092 | 0.679* | 0.291 | -0.901** | -0.161 | -0.053 | 1 | | | | |
| C : K | -0.433 | 0.007 | -0.388 | 0.123 | -0.497 | 0.622 | -0.191 | 1 | | | |
| N : P | -0.016 | 0.533 | 0.155 | -0.844** | -0.261 | -0.205 | 0.960** | -0.169 | 1 | | |
| N : K | -0.429 | -0.076 | -0.564 | 0.035 | -0.760 | 0.299 | -0.098 | 0.862** | 0.024 | 1 | |
| P : K | -0.623 | -0.547 | -0.767* | 0.571 | -0.581 | 0.392 | -0.584 | 0.749* | -0.482 | 0.744* | 1 |

由表 5 可知,红桦含水率与 C : K 显著负相关($P < 0.01$),与 N : K 也显著性负相关($P < 0.05$),C 含量与 P : K 呈显著性正相关,N 含量与 C : N 呈显著性负相关,P 含量与 C : P 呈显著性负相关,C : N 与 N : P 呈显著性负相关,C : P 与 N : P 呈

显著性正相关,C : K 与 N : K 呈显著性正相关,只有含水率与 C : K 在 $P < 0.01$ 水平显著性相关,其他都是在 $P < 0.05$ 水平上呈显著性相关。2 种次生林 C : P 与 N : P 呈显著性正相关,C : K 与 N : K 呈显著性正相关,P 含量与 C : P 呈显著性负相关。

表 5 红桦化学计量特征与化学计量比的相关性

Table 5 Correlationships of stoichiometric characteristics and stoichiometric ratio of *B. albosinensis*

| 参数 | 含水率 | C | N | P | K | C : N | C : P | C : K | N : P | N : K | P : K |
|-------|----------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 含水率 | 1 | | | | | | | | | | |
| C | 0.073 | 1 | | | | | | | | | |
| N | -0.089 | 0.031 | 1 | | | | | | | | |
| P | 0.284 | 0.524 | 0.568 | 1 | | | | | | | |
| K | 0.360 | -0.437 | 0.535 | 0.265 | 1 | | | | | | |
| C : N | 0.472 | -0.026 | -0.854* | -0.177 | -0.275 | 1 | | | | | |
| C : P | -0.522 | -0.724 | -0.384 | -0.823* | -0.231 | 0.079 | 1 | | | | |
| C : K | -0.898** | 0.073 | -0.007 | -0.389 | -0.595 | -0.425 | 0.466 | 1 | | | |
| N : P | -0.596 | -0.679 | 0.184 | -0.621 | -0.009 | -0.481 | 0.802* | 0.589 | 1 | | |
| N : K | -0.769* | 0.149 | 0.478 | -0.054 | -0.310 | -0.782* | 0.163 | 0.865* | 0.570 | 1 | |
| P : K | -0.322 | 0.808* | 0.338 | 0.468 | -0.326 | -0.434 | -0.572 | 0.456 | -0.294 | 0.609 | 1 |

3 结论与讨论

3.1 2 种次生林各器官含水率与化学计量特征的相关性

水分是植物生命活动的必需因子,限制着生态

系统中植物的组成、生长状况和分布范围^[28],关于植物生长与水分变化关系研究中,有许多学者通过植物组织含水量、蒸腾速率、水势、渗透势等测定研究植物体内水分对植物形态、生理活动的影响^[29-31],本文也是通过对 2 种次生林不同植物器官的含水率

与化学计量特征和化学计量比之间的关系的研究可知,2种次生林叶片含水率最大,其次为根;含水率从大到小依次是叶片、根、主干、一级枝、二级枝、三级枝和四级枝,除了叶片以外,其他部位都表现出从生理学上端到下端含水率依次降低,红桦叶片和根含水率都大于辽东栎,红桦含水率与C:K显著负相关($P<0.01$),红桦主要是落叶阔叶树种红桦和白桦,叶片膜质。

3.2 2种次生林不同器官C、N、P和K含量特征

C、N、P、K 4种元素作为植物体内重要的生命元素和化学元素,反映了植物在一定生存环境下,吸收和储存养分的能力^[32-33],由于物种自身的生理特性,导致各物种的营养元素在不同时间序列、不同空间位置上均有差异^[34]。其中C作为含量最高的元素,反映了植物积累有机物质的能力^[16]。本研究中2种次生林不同器官C含量在 $382.36\sim 529.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比栗忠飞等^[35]对哀牢山常绿阔叶林幼树C、N、P生态化学计量特征和郑跃芳等^[36]对亚热带4种林木幼苗C、N、P含量及化学计量特征研究的结果较高,其原因可能是本研究中2种次生林多为中龄林,正处于生理旺盛阶段,积累储存C的能力相对幼树和老树强,且温差较大,故C含量也相对较高。叶片是重要的同化器官,具有独特的抗寒、抗旱形态结构,需较多的养分用于构建这些保卫结构,2种次生林叶片C含量最高,辽东栎为 $529.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,红桦为 $526.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,两者叶片C含量相差不大,但是均大于Elser等^[37]对全球492种陆地植物叶片研究所得C含量 $464.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时也大于黄建军等^[38]对亚热带的浙江天童32种植物的 $450\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,但与张雨鉴等^[39]对滇中亚高山森林乔木层研究相差不大,说明甘南白龙江2种次生林叶片固能力相对较强,所积累的有机质相对较多。C是从生理学下端向上端运输,即从叶片向根部运输,红桦从叶片到根,C含量依次减小,根部主要进行水分和无机盐交换,养分储存较少,因而C含量最低,这与李丽等^[40]对横断山区高山栎组灌木型植物生态化学计量特征一致。2种次生林不同枝级、根和叶片C的变异系数在 $2.37\%\sim 3.79\%$,属于弱变异。辽东栎C含量与C:P与红桦的P:K呈显著性正相关($P<0.05$),

N、P是植物生长发育中各种代谢过程必不可少的功能元素,但其供应往往受到自然界的限制^[41]。本研究中2种次生林平均N含量辽东栎为 $7.89\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,红桦为 $9.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与滇中亚高山森林乔木层含N量基本一致($9.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),显著低于全球尺度的平均N含量($18.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),导致

该结果的原因可能是降雨造成移动性较强的有效态氮的淋溶作用^[42]。

叶片N、P含量明显大于其他部位,可能是叶片光合作用过程中需要大量N素用于叶绿素等的合成,同时,叶片光合作用的同化过程和光合磷酸化过程也需要大量P支持,因而为进一步提高叶片的光合速率,分配到叶片中N、P含量显著高于根、茎、枝,这与李丽等^[40]的研究一致。2种次生林N变异系数小于P,根和主干的变异系数较大,主要可能是根和主干是植物吸收和运输器官,N、P的吸收和利用受温度、土壤养分含量的影响较大。红桦C、N、P含量都大于辽东栎,说明红桦合成和积累有机质的能力较高。辽东栎NK呈显著性正相关($P<0.05$),P含量与C:P和N:P在 $P<0.01$ 水平上呈显著负相关,红桦P与C:P也呈显著负相关($P<0.05$)。

K决定了植物的耐旱性和耐寒能力,有助于提高植物的抗逆性,也是许多酶的活化剂,还能促进光合作用,在植物竞争中起着重要的作用^[43],辽东栎K含量平均为 $18.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,红桦含K量为 $17.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,2种次生林叶片K含量明显大于其他器官,根部是吸收钾元素的主要器官,根部K含量大于主干,从一级枝到叶片K含量逐渐增加。K是植物体内易移动的元素,在2种次生林不同枝级、根和叶片之间的变异较大。K含量与C、N、P、K之间的化学计量比呈负相关。

3.3 2种不同次生林各器官C、N、P和K化学计量特征

C、N、P、K化学计量比影响群落结构和功能^[39],C:N、C:P反映植物吸收N、P时同化C的能力,即单位养分吸收所合成有机物的量^[44],2种次生林C:N和C:P高于全球植物尺度内的C:N和C:P^[37],说明该区域内的2种次生林C的利用效率较强,同时也间接反映了该研究区土壤中N、P供应相对不足,且P含量与其相关性较弱^[45],这与李鸿博等^[46]对金沙江干热河谷典型植物叶片的化学计量特征研究一致。C:N和C:P最小值出现在叶片中,这与张雨鉴等^[39]研究一致,这是因为叶片作为同化器官,N、P含量相对较高,而C含量在各器官之间差异相对较小。2种次生林根的C:P最大,依次是根>主干>一级枝>二级枝>三级枝>四级枝>叶片。

植物N:P是用于判断N饱和与P缺乏的关键指标,当植物N:P<10时,N元素是限制植物生长的关键元素,当N:P>20时,P元素则起到了主要限制作用^[40],当N:P在10~20时,受N、P共同

限制。在本研究中,只有2种次生林叶片的N:P最大在10~20,其他器官N:P都<10,说明该区域植物生长主要受N元素的影响,2种次生林叶片生长受2种元素的限制,其次根得N:P均大于其他枝级,不同枝级和主干N:P均存在着差异,这可能与植物不同器官养分的吸收、分配和利用效率以及各器官结构和功能存在差异有关。2种次生林叶片C:K、P:K和N:K都最小,说明叶片吸收和积累K的能力较弱,不同枝级和主干的C:K较大,说明K在运输过程中积累在主干和枝的较多。2种次生林的C:P与N:P都呈显著性正相关,C:K与P:K也呈显著性正相关,辽东栎的N:K与P:K呈显著性正相关($P<0.05$)。

甘南白龙江2种次生林不同器官各元素含量和化学计量特征均存在差异,叶片C、N、P和K4种元素含量最高,C的变异系数最小,红桦C和P含量从植物生理学的上端到下端依次增大,N和K主干<一级枝<二级枝<三级枝<叶片,P与C:P也呈显著负相关,C:P与N:P呈显著性正相关,C:K与P:K呈显著性正相关。辽东栎P含量与红桦变化规律一致,且C:P与N:P呈显著性正相关,C:K与P:K呈显著性正相关,红桦C、N、P含量都大于辽东栎,说明红桦合成和积累有机质的能力较强。研究植物化学计量特征时应综合考虑植物及营养元素在器官中的分配状况。另外,考虑到植物随着年龄的增长,各器官的C、N、P、K化学计量特征会随之发生变化,因此,将来还应对其在时间上变化特征进行后续研究。

参考文献:

- [1] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [2] 王宝荣, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原子午岭林区两种天然次生林植物叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5461-5473.
WANG B R, ZENG Q C, AN S S, *et al.* C:N:P stoichiometry characteristics of plants-litter-soils in two kind types of natural secondary forest on the Ziwoiling region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5461-5473. (in Chinese)
- [3] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [4] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton University Press, Princeton, USA, 2002: 225-226.
- [5] TESSIER J T, RAYNAL D J. Vernal nitrogen and phosphorus retention by forest understory vegetation and soil microbes[J]. Plant and Soil, 2003, 256(2): 443-453.
- [6] MOOSHAMMER M, WANEK W, SCHNECKER J, *et al.* Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter[J]. Ecology, 2012, 93(4): 770-782.
- [7] 蒋龙, 徐振锋, 吴福忠, 等. 亚热带3种典型常绿森林土壤和植物叶片C、N、P化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(4): 1-16.
- [8] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [9] 陈发军, 李斌, 张静, 等. 川西北高原13种主要植物叶片的化学计量学特征分析[J]. 核农学报, 2017, 31(6): 1179-1184.
- [10] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)
- [11] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F 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.
- [12] CHEN Y, HAN W, TANG L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus concentrations of woody plants differ in responses to climate, soil and plant growth form[J]. Ecography, 2013, 36(2): 178-184.
- [13] 皮发剑, 袁丛军, 喻理飞, 等. 黔中天然次生林主要优势树种叶片生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 801-807.
- [14] 赵耀, 王百田, 李萌, 等. 晋西吕梁山区3种森林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(3): 518-524.
- [15] 李茜, 彭守璋, 陈云明. 子午岭林区两种天然次生林叶片C、N、P化学计量特征的季节变化[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 319-325.
LI Q, PENG S Z, CHEN Y M. Seasonal variations of C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of two natural secondary forests in Ziwoiling forest district[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2017, 31(6): 319-325. (in Chinese)
- [16] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
YU Y F, PENG W X, SONG T Q, *et al.* Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between karst hills, Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 947-954. (in Chinese)
- [17] 白雪娟, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同人工林叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3823-3830.
BAI X J, ZENG Q C, AN S S, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil in different plantations on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3823-3830. (in Chinese)
- [18] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [19] 陈力, 刘国华, 刘丹, 等. 亚高山针叶林不同大小林窗植物多样性及其海拔动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(10): 90-97.
CHEN L, LIU G H, LIU D, *et al.* Plant diversity and elevation dynamics in forest gaps of varying sizes in subalpine co-

- niferous forest[J]. Journal of Central South University of Forestry Thchnology, 2017, 37(10): 90-97. (in Chinese)
- [20] KOHYAMA T. Significance of architecture and aometry in saplings[J]. Functional Ecology, 1987, 1: 399-404.
- [21] RUNGUO Z, YOUXU J. Review on the architecture of tropical trees[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(5): 112-119.
- [22] 朱教君. 次生林经营基础研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1689-1694.
- ZHU J J. A review on fundamental studies of secondary forest management[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(12): 1689-1694. (in Chinese)
- [23] 王飞, 霍怀成, 赵阳, 等. 甘南高山林线岷江冷杉—杜鹃种群结构与动态[J]. 植物研究, 2019, 39(5): 664-672.
- WANG F, HUO H C, ZHAO Y, *et al.* Population structure and dynamics of the original *Abies faxoniana* Rehd—*Rhododendron simsii* planch in high-mountain timberline of Southern Gansu Province[J]. Bulletin of Botanical Research, 2019, 39(5): 664-672. (in Chinese)
- [24] 杨永红, 王飞, 曹秀文, 等. 甘南白龙江上游高山林线过渡区地被物及土壤水文特性[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 145-150.
- [25] 邱祖青, 杨永宏, 曹秀文, 等. 白龙江干旱河谷木本植物多样性及其区系地理特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(5): 119-125.
- QIU Z Q, YANG Y H, CAO X W, *et al.* Species diversity and floristic characteristics of woody plants in the dry valley of the Bailong River, China[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007, 42(5): 119-125. (in Chinese)
- [26] 王飞, 陈国鹏, 齐瑞, 等. 甘南白龙江上游小流域主要林分地被物层的持水特性分异简[J]. 水土保持研究, 2016(6): 242-247.
- [27] 魏怀东, 陈芳, 张勃, 等. 民勤 10 种典型荒漠植物冠层光谱与含水率的特征分析[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 590-596.
- [28] MARTIN B, THORSTENSON Y R. Stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$), water use efficiency, and biomass productivity of *Lycopersicon esculentum*, *Lycopersicon pennense*, *Quercus wutaishanica*, and the F1 hybrid[J]. Plant Physiology, 1988, 88(1): 213-217.
- [29] 牛赞, 成彩霞, 李小燕, 等. 河西走廊荒漠区植物生长与水分变化关系分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1417-1424.
- [30] 奚如春, 马履一, 王瑞辉, 等. 林木耗水调控机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 692-697.
- [31] 白登忠, 邓西平, 黄明丽. 水分在植物体内的传输与调控[J]. 西北植物学报, 2003, 23(9): 1637-1643.
- [32] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 不同林龄马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J]. 环境生态学报, 2014, 23(2): 188-195.
- [33] 李婷婷, 陆元昌, 张显强, 等. 经营的马尾松森林类型发育演替阶段量化指标研究[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 9-17.
- LI T T, LIU Y H, ZHANG X Q, *et al.* Quantitative indices to identify succession stages of managed *Pinus massoniana* forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 9-17. (in Chinese)
- [34] 孙雪娇, 常顺利, 宋成程, 等. 雪岭云杉不同器官 N、P、K 化学计量特征随生长阶段的变化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1291-1298.
- [35] 栗忠飞, 郭盘江, 刘文胜, 等. 哀牢山常绿阔叶林幼树 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 22-26.
- LI Z F, GUO P J, LIU W S, *et al.* C, N and P stoichiometry of young trees in montane moist evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(4): 22-26. (in Chinese)
- [36] 郑跃芳, 钟全林, 程栋梁, 等. 亚热带 4 种林木幼苗的碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 379-383.
- [37] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [38] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2003(1): 92-97.
- HUANG J J, WANG X H. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad-leaved species[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2003(1): 92-97. (in Chinese)
- [39] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤. 滇中亚高山森林乔木层各器官生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1669-1678.
- [40] 李丽, 胡君, 于倩楠, 等. 横断山区高山栎组灌木型植物 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 山地学报, 2018, 36(6): 878-888.
- LI L, HU J, YU Q N, *et al.* Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in uercus sect[J]. Heterobalanus Shrubs in the Hengduan Mountain, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(6): 878-888. (in Chinese)
- [41] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1054-1061.
- [42] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2658-2665.
- HONG J B, WU J B, WANG X D. Chinese Journal of Plant Ecology[J], 2013, 24(9): 2658-2665. (in Chinese)
- [43] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原织坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1084-1091.
- [44] HAN W, FANG J, GUO D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [45] 邱岭军, 胡欢甜, 林宝平, 等. 不同林龄杉木养分重吸收率及其 C : N : P 化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 22-27.
- QIU L J, HU H T, LIN B P, *et al.* Nutrient resorption efficiency and C : N : P stoichiometry of cunninghamia lanceolata Plantations with different ages [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 22-27. (in Chinese)
- [46] 李鸿博, 许云蕾, 余志祥, 等. 金沙江干热河谷典型植物叶片 C、N、P 生态化学计量特征研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 10-16.
- LI H B, XU Y L, YU Z X, *et al.* Eco-stoichiometric characteristics of C, N and P in the leaves of typical plant in dry-Hot valley of Jinsha River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 10-16. (in Chinese)