

油茶不同器官氮、磷、钾化学计量特征随年龄的变化

王增¹, 蒋仲龙¹, 刘海英², 叶柳欣³, 汪舍平⁴, 张勇¹, 金锦³, 吴家森³

(1. 浙江省林业生态工程管理中心, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省国有林场和森林公园保护总站, 浙江 杭州 310020; 3. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 4. 浙江省常山县林业局, 浙江 常山 324200)

摘要: 油茶 *Camellia oleifera* 为中国特有的食用油料树种, 但关于油茶不同器官氮、磷、钾的生态化学计量特征的认识还不够充分。以浙江省常山县油茶人工林为对象, 通过测定不同年龄油茶叶片、枝条、主干、根系和果实中氮、磷、钾质量分数, 探讨了油茶不同年龄各器官氮、磷、钾化学计量特征及在各器官中的分配规律。结果表明: 油茶氮质量分数从大到小依次为叶片、枝条、根系、果实、主干, 磷质量分数从高到低依次为叶片、枝条、果实、根系、主干, 钾质量分数从高到低依次为果实、叶片、根系、枝条、主干; 随年龄的增加, 枝条中的氮、磷质量分数逐渐增大, 而其他器官中氮、磷质量分数先增大后减小, 钾质量分数先增高而后降低。油茶各器官氮磷比(N:P)为 3.91~10.68, 氮钾比(N:K)为 0.33~1.31, 钾磷比(K:P)为 3.71~19.08; 随年龄的增长, 油茶果实 N:P 逐渐增高, 而其他器官 N:P 则先增高而后降低, 叶片、枝条、根系和果实的 N:K 逐渐增大, 叶片、主干和果实 K:P 先升高而后下降, 枝条、根系的 K:P 逐渐降低。油茶叶片的氮、磷平均分配比例为 31.4%和 28.6%, 钾在根系中具有最高的分配比例, 平均占比达 30.5%。影响油茶生长的限制元素是氮, 在生产经营过程中, 可适当增施氮。图 1 表 4 参 26

关键词: 森林生态学; 油茶; 器官; 生态化学计量; 分配; 年龄

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)02-0264-07

Ecological stoichiometry of N, P, and K with age in *Camellia oleifera* organs

WANG Zeng¹, JIANG Zhonglong¹, LIU Haiying², YE Liuxin³, WANG Sheping⁴, ZHANG Yong¹, JIN Jin³, WU Jiasen³

(1. Zhejiang Forestry Ecological Engineering Management Center, Hangzhou 310020, Zhejiang, China; 2. Zhejiang State Forest Farm and Forest Park Administration, Hangzhou 310020, Zhejiang, China; 3. School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 4. Forest Enterprise of Changshan County, Changshan 324200, Zhejiang, China)

Abstract: To better understand the distribution of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) over time in different organs of *Camellia oleifera*, a special edible oil tree species in China, samples of leaves, branches, stems, roots and fruits at different ages were collected from *C. oleifera* in Changshan County, Zhejiang Province. N, P and K content were measured to analyze the stoichiometry characteristics at different ages in the context of a distribution strategy. Results showed that average N content was leaf > branch > root > fruit > stem, average P content was leaf > branch > fruit > root > stem, and average K content was fruit > leaf > root > branch > stem. With an increase in age, in the branch the N and P content increased gradually; whereas, in the other organs, N and P content first increased and then decreased. For all organs, K content first increased and then decreased as time increased. The values for N:P were 3.91–10.68; for N:K were 0.33–1.31;

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-07-25

基金项目: 浙江省林业生态工程管理中心资助项目(HZYX-LY-17111GK)

作者简介: 王增, 工程师, 从事林业生态工程管理工作。E-mail: 306368854@qq.com。通信作者: 吴家森, 教授级高级工程师, 博士, 从事森林土壤与环境研究。E-mail: jswu@zafu.edu.cn

and for K:P were 3.71–19.08. With increased age in fruits, N:P increased gradually, and in other organs N:P first increased and then decreased; in leaves, branches, roots, and fruits, N:K increased gradually; in leaves, stems, and fruits, K:P first increased and then decreased; and in branches and roots, K:P decreased gradually. In the leaves the average distribution ratio of N was 31.4%, and P was 28.6%. K had its highest proportion in the roots with an average ratio of 30.5%. Thus, the limiting element affecting the growth of *C. oleifera* was N; so in the process of production, N fertilizer should be properly added. [Ch, 1 fig. 4 tab. 26 ref.]

Key words: forest ecology; *Camellia oleifera*; organ; ecological stoichiometry; distribution; different age

氮、磷、钾是植物生长必需的三大营养元素, 其生态化学计量特征反映了植物器官的内稳性及元素在不同器官中的分配和相互关系, 同时计量比又可以判断限制性元素和养分利用效率的高低^[1-2]。国内外学者从不同尺度研究了植物营养元素与环境的关系^[3-4]及植物化学计量特征对土壤管理、经营措施的影响^[5-6]。植物对营养元素的分配在不同器官间并不一致, 植物的生态化学计量特征在不同年龄、不同季节、不同海拔间均具有一定的差异^[7-9]。目前, 生态化学计量的研究多集中于植物的叶片, 对于枝、干、根的元素分配及其随年龄的变化则报道不多。油茶 *Camellia oleifera* 是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 小乔木, 在中国已有 2 300 多年的栽培和利用历史, 是世界四大木本油料植物之一。目前, 中国油茶面积为 3.7×10^6 hm², 油茶籽年产量为 1.8×10^6 t, 茶油产量为 4.5×10^5 t, 占全球茶油总产量的 95% 以上^[10]。已有研究^[11-12]表明: 油茶不同器官以氮含量为最高, 其次是钾, 叶的营养元素含量高于枝、根, 吸收量、存留量、归还量从大到小依次为氮、钾、磷^[13], 而有关油茶氮、磷、钾化学计量比的研究则未见报道。本研究以 3, 6, 9, 30 年生油茶林为对象, 采样分析了油茶不同器官的氮、磷、钾质量分数及其生态化学计量特征, 揭示了油茶叶、枝、干、根、果实元素间的分配, 可为油茶人工林的土壤管理提供理论基础, 同时可丰富经济林树种的生态化学计量学内容。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省常山县芳村镇(28°46′~29°13′ N, 118°15′~118°45′ E), 有“中国油茶之乡”之美称, 属亚热带季风季候, 年平均气温为 17.4 °C, 年平均降水量为 1 725.0 mm, 年平均无霜期为 238 d, ≥ 10 °C 有效积温为 5 514 °C, 土壤为红壤。不同年龄油茶林土壤基本理化性质如表 1 所示。30 年生油茶林只进行土壤的垦复, 没有进行施肥, 而其他年龄段油茶则于每年 10–11 月, 施用商品有机肥 1 kg·株⁻¹, 5–6 月施肥复合肥 [$m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=15:15:15$] 0.10~0.15 kg·株⁻¹。

1.2 实验设计与采样

2017 年 8 月, 根据森林经营档案和全面踏查的基础上, 选取 3, 6, 9, 30 年生的油茶林分, 分别建立 20 m × 10 m 的标准地各 4 个, 共 16 个。对标准地内的油茶地径、株高进行全面调查, 计算平均地径、平均株高(表 2), 而后选取标准株(地径和株高均为平均值)各 3 株, 并采用全收获法挖掘, 野外分离叶片、枝条、主干、根系和果实, 并分别称量, 同时均匀选取不同器官样品 500~1 000 g(准确称量)于样品袋中, 带回实验室^[14]。

1.3 样品处理与测定

采回的样品在实验室中用去离子水清洗后 105 °C 杀青 30 min, 而后在 80 °C 烘干至恒量, 用高速粉碎机将样品粉碎过 0.149 mm 后备用。氮质量分数采用 Elementar Vario MAX CN 碳氮元素分析仪(德国 Elementar 公司)测定; 硫酸-过氧化氢(H₂SO₄-H₂O₂)消煮, 钼蓝比色-分光光度法测定磷质量分数; 火焰分光光度法测定钾质量分数^[15]。

表 1 不同年龄油茶林土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil under different age of *Camellia oleifera* plantations

| 林龄/a | pH 值 | $w_{\text{有机碳}}/$ (g·kg ⁻¹) | $w_{\text{碱解氮}}/$ (mg·kg ⁻¹) | $w_{\text{有效磷}}/$ (mg·kg ⁻¹) | $w_{\text{速效钾}}/$ (mg·kg ⁻¹) |
|------|------|--|---|---|---|
| 3 | 4.5 | 9.32 | 70.82 | 8.45 | 92.2 |
| 6 | 4.9 | 12.84 | 78.35 | 9.82 | 99.3 |
| 9 | 4.9 | 14.80 | 76.56 | 10.52 | 97.5 |
| 30 | 5.1 | 16.52 | 74.45 | 6.25 | 94.2 |

表2 不同年龄油茶林基本情况

Table 2 Basic information of sampling plots under different ages of *Camellia oleifera*

| 林龄/a | 地径/cm | 树高/m | 冠幅/ (m×m) | 密度/(株·hm ⁻²) | 生物量/(kg·株 ⁻¹) | | | | | |
|------|-------|------|--------------|--------------------------|---------------------------|------------|-------------|------------|-----------|-------|
| | | | | | 叶片 | 枝条 | 主干 | 根系 | 果实 | 全株 |
| 3 | 2.0 | 1.0 | 0.5×0.5 | 1 500 | 0.16(16.2) | 0.26(26.3) | 0.32(32.3) | 0.25(25.3) | | 0.99 |
| 6 | 3.6 | 1.6 | 1.2×1.2 | 1 500 | 0.42(17.1) | 0.63(25.7) | 0.77(31.4) | 0.57(23.3) | 0.06(2.4) | 2.39 |
| 9 | 5.4 | 2.2 | 1.5×1.5 | 1 500 | 0.81(15.6) | 1.45(28.0) | 1.63(31.5) | 1.05(20.3) | 0.24(4.6) | 4.94 |
| 30 | 15.0 | 3.5 | 2.5×2.5 | 1 200 | 4.89(14.3) | 8.74(25.6) | 13.39(39.2) | 6.55(19.2) | 0.61(1.8) | 33.57 |

说明：括号中的数值表示不同器官生物量占全株的百分比(%)

1.4 数据整理与分析

实验数据均在 Excel 2003 进行整理和作图，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)的最小显著差异(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同年龄油茶植株氮、磷、钾质量分数及其比值

2.1.1 油茶不同器官氮、磷、钾化学计量平均值 油茶氮平均质量分数在不同器官中从大到小的顺序为叶片、枝条、根系、果实、主干，磷质量分数从高到低排序为叶片、枝条、果实、根系、主干，钾质量分数从高到低顺序为果实、叶片、根系、枝条、主干，叶片氮、磷质量分数显著高于其他器官($P<0.05$)，叶片钾质量分数显著高于枝条、主干($P<0.05$)，而主干氮、磷、钾质量分数均显著比其他器官低($P<0.05$)(表3)。油茶根系和主干的氮磷比(N:P)显著高于枝条和果实，叶片和枝条的氮钾比(N:K)显著高于其他器官($P<0.05$)，根系钾磷比(K:P)显著高于其他器官($P<0.05$)。

表3 油茶不同器官氮、磷、钾化学计量平均值

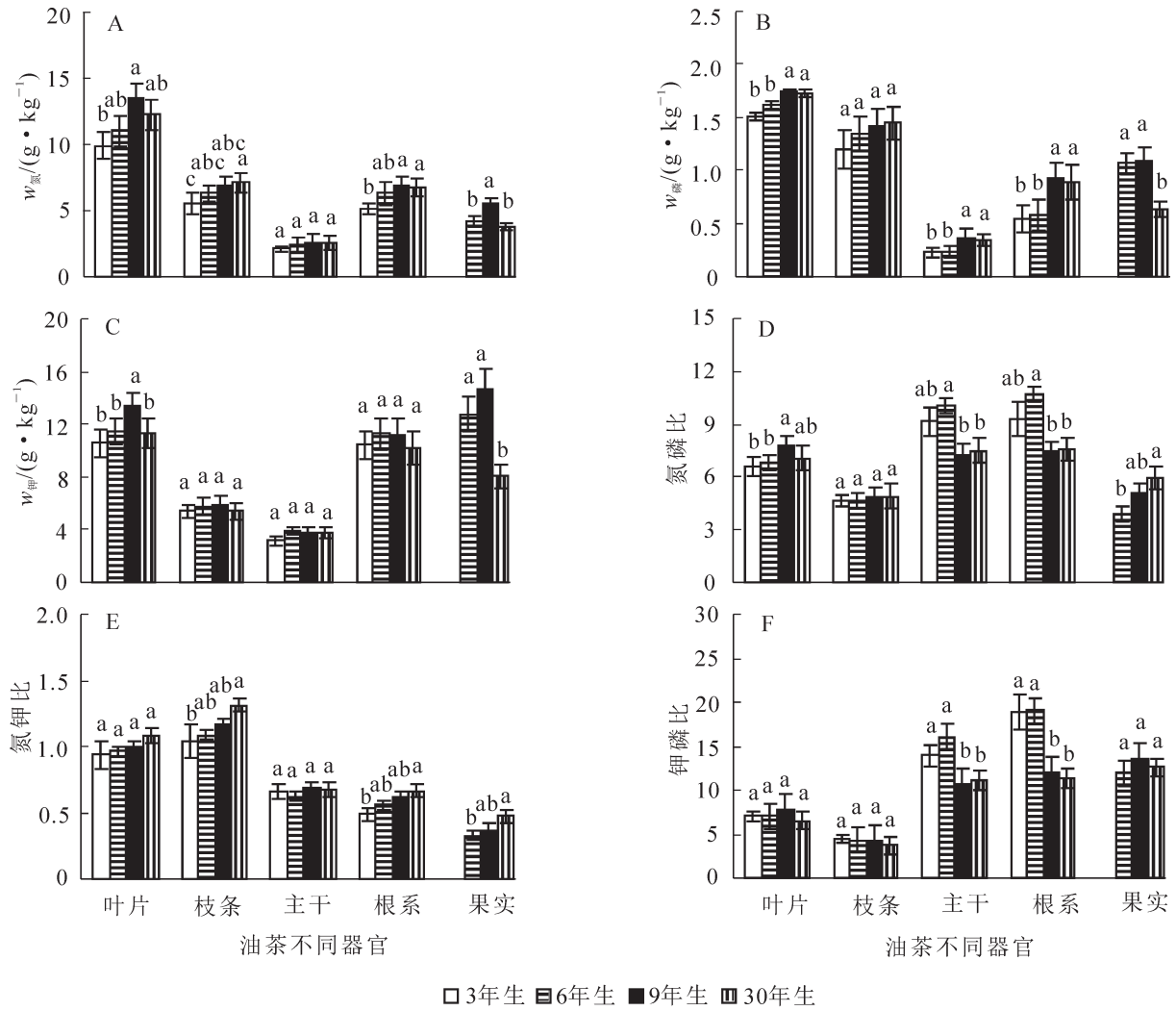
Table 3 Average content and stoichiometric ratio of N, P, K in different organs of *Camellia oleifera*

| 器官 | $w_{\text{氮}}/(g \cdot kg^{-1})$ | $w_{\text{磷}}/(g \cdot kg^{-1})$ | $w_{\text{钾}}/(g \cdot kg^{-1})$ | N:P | N:K | K:P |
|----|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|---------------|----------------|
| 叶片 | 11.66 ± 1.18 a | 1.65 ± 0.08 a | 11.69 ± 0.90 a | 7.03 ± 0.36 ab | 1.00 ± 0.04 a | 7.06 ± 0.65 c |
| 枝条 | 6.48 ± 0.53 b | 1.36 ± 0.08 b | 5.62 ± 0.22 b | 4.76 ± 0.11 c | 1.15 ± 0.09 a | 4.16 ± 0.71 d |
| 主干 | 2.41 ± 0.16 c | 0.29 ± 0.06 d | 3.66 ± 0.23 c | 8.48 ± 1.09 a | 0.66 ± 0.02 b | 12.94 ± 0.80 b |
| 根系 | 6.28 ± 0.59 b | 0.74 ± 0.17 c | 10.77 ± 0.44 a | 8.72 ± 1.23 a | 0.58 ± 0.06 b | 15.34 ± 0.74 a |
| 果实 | 4.50 ± 0.89 bc | 0.94 ± 0.26 bc | 11.86 ± 1.12 a | 4.96 ± 1.02 c | 0.39 ± 0.07 c | 12.65 ± 0.77 b |

说明：同列不同小写字母表示不同器官间在 0.05 水平上差异显著

2.1.2 油茶不同年龄器官氮、磷、钾质量分数 随年龄的增长，油茶枝条氮质量分数随之增高，其他器官氮质量分数则表现为先升高后降低(图 1A)，其中 9 年生油茶叶片和根系氮质量分数显著高于 3 年生($P<0.05$)，30 年生油茶枝条氮质量分数显著高于 3 年生($P<0.05$)，9 年生油茶果实氮质量分数显著高于 6 年生和 30 年生($P<0.05$)。随年龄的增长，油茶枝条磷质量分数随之增加，其他器官磷质量分数则表现为先升高而后略有下降(图 1B)，其中 9 年生和 30 年生油茶叶片、主干、根系磷质量分数显著高于 3 年生和 6 年生($P<0.05$)，6 年生和 9 年生油茶果实磷质量分数显著高于 30 年生($P<0.05$)。不同器官钾质量分数均随着油茶年龄的增长先增高后降低(图 1C)。不同树龄的叶片、果实之间存在显著差异，9 年生油茶叶片钾质量分数显著高于其他年龄($P<0.05$)，6 年生和 9 年生油茶果实钾质量分数显著高于 30 年生($P<0.05$)。

2.1.3 油茶不同器官氮、磷、钾比值 油茶果实氮磷比(N:P)随着年龄的增长而增大，其他器官 N:P 则表现为先增高后降低(图 1D)，其中叶片和枝条 N:P 以 9 年生油茶为最高，而主干和根系 N:P 则以 6 年生油茶为最高。9 年生油茶叶片 N:P 显著高于 3 年生和 6 年生($P<0.05$)，6 年生油茶主干和根系 N:P 显著高于 9 年生和 30 年生($P<0.05$)，30 年生油茶果实 N:P 显著高于 6 年生($P<0.05$)。油茶叶片、枝条、根系和果实氮钾比(N:K)随着年龄的增长而增大，而主干 N:K 相对稳定(图 1E)。30 年生油茶枝条、根系 N:K 显著高于 3 年生($P<0.05$)，果实 N:K 则表现为 30 年生显著高于 6 年生($P<0.05$)。随着油茶年龄的增长，叶片、主干和果实钾磷比(K:P)先升高而后下降，而枝条和根系 K:P 则逐渐降低(图 1F)，3



不同小写字母表示同一器官不同年龄油茶间在 0.05 水平上差异显著

图 1 不同年龄油茶植株氮、磷、钾质量分数及其比值

Figure 1 Content of N, P, K and stoichiometric ratio in different organs under different ages of *Camellia oleifera*

年生和 6 年生油茶主干和根系的 K:P 显著高于 9 年生和 30 年生 ($P < 0.05$)。

2.2 不同器官氮、磷、钾的分配

如表 4 所示：油茶氮素在不同器官的分配比例从大到小依次为叶片、枝条、根系、主干、果实；随着年龄的增大，氮素在叶片、果实中的分配比例表现为先增大而后降低，而在枝条、主干、根系中则表现为先下降而后上升。油茶磷素平均分配从大到小表现为枝条、叶片、根系、主干、果实。随着年龄的增大，磷素在叶片、枝条中的分配比例先下降而后上升，而在根系、果实中则表现为先升高而后下降。油茶钾素在不同器官的平均分配从大到小排序依次为根系、叶片、枝条、主干、果实。随着年龄的增大，钾素在叶片和果实中的分配率先升高而后下降，而在枝条、主干和根系中则表现为先下降而后升高。

表 4 不同年龄油茶氮、磷、钾储量在各器官内的分配

Table 4 Distribution of N, P and K in different organs of *Camellia oleifera*

| 年龄/a | 氮占比/% | | | | | 磷占比/% | | | | | 钾占比/% | | | | |
|------|-------|------|------|------|-----|-------|------|------|------|-----|-------|------|------|------|-----|
| | 叶片 | 枝条 | 主干 | 根系 | 果实 | 叶片 | 枝条 | 主干 | 根系 | 果实 | 叶片 | 枝条 | 主干 | 根系 | 果实 |
| 3 | 31.8 | 29.2 | 13.5 | 25.5 | | 31.2 | 42.0 | 9.2 | 17.6 | | 24.7 | 20.4 | 16.7 | 38.2 | |
| 6 | 32.4 | 27.8 | 12.9 | 25.1 | 1.8 | 29.3 | 35.8 | 11.0 | 21.3 | 2.6 | 30.8 | 20.2 | 16.3 | 28.5 | 4.2 |
| 9 | 32.3 | 29.7 | 12.6 | 21.5 | 3.9 | 26.6 | 40.0 | 10.5 | 17.9 | 5.0 | 24.4 | 21.0 | 16.5 | 28.7 | 9.4 |
| 30 | 29.5 | 30.6 | 16.8 | 22.0 | 1.1 | 27.8 | 40.7 | 13.4 | 16.8 | 1.3 | 24.8 | 21.3 | 21.2 | 30.6 | 2.1 |
| 平均 | 31.4 | 29.2 | 13.8 | 23.4 | 2.2 | 28.6 | 39.3 | 10.9 | 18.3 | 2.9 | 26.1 | 20.6 | 17.6 | 30.5 | 5.2 |

3 讨论与结论

3.1 油茶氮、磷、钾质量分数总体特征

植物不同器官氮、磷、钾质量分数体现了植物对养分的吸收及需求,反映了植物对不同环境的适应能力,也体现在不同空间和时间上营养元素存在的差异。本研究结果表明:不同年龄油茶叶片、枝条和根系的氮质量分数平均值分别为 11.66, 6.48, 6.28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 磷质量分数平均值分别为 1.65, 1.36, 0.74 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同器官氮、磷质量分数与广西三江县油茶成熟林相似^[12], 而高于湖南耒阳油茶相应器官^[13]。油茶叶片氮质量分数低于全国陆生植物叶片的平均值(18.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[16-17], 主要原因可能是寿命较长的常绿阔叶植物叶片氮质量分数较寿命短的落叶植物低^[18]。本研究中油茶叶片磷质量分数低于全球陆地植物叶片(1.80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)而高于全国陆生植物(1.21 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[16,19]。

油茶叶片、枝条和根系钾质量分数平均值分别为 11.69, 5.62, 10.77 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于湖南耒阳市和广西三江县油茶林^[12-13]。油茶叶片钾质量分数低于黔中喀斯特区 24 种典型植物叶片的钾质量分数(12.25 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[20]和全国植物叶片平均水平(15.09 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17], 而高于滇池流域富磷区域植物叶片(10.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[21]。随着年龄的增大,油茶各器官氮、磷、钾质量分数总体表现为先升高而后下降,以 9 年生油茶为最高,这主要是该时期油茶生长速度较快,在蛋白质合成过程中需要大量的氮、磷、钾^[22]。叶片叶绿素质量分数和氮、磷利用效率以 10 年生油茶为最高^[23],因此该年龄段油茶植株的营养元素质量分数均为最高,这与同一科属的茶叶氮磷质量分数随林龄的变化规律相似^[24]。

3.2 油茶氮、磷、钾化学计量比随树龄的变化

营养元素化学计量比体现了植物生长策略和环境养分限制。氮、磷、钾是影响植物生长的限制性元素, N:P, N:K 和 K:P 可作为森林植物营养元素限制的判断性指标。研究表明:当 N:P 小于 14 时,植物生长主要受氮的限制;当 N:P 大于 16 时,植物生长主要受磷的限制;当 N:P 为 14~16 时,受氮和磷的共同限制^[20,22]。本研究表明:油茶各器官 N:P 介于 4.76~8.48, 远远低于 14, 表明油茶人工林生长严重受到氮的限制。油茶叶片 N:P 随着年龄的增长先增高而后降低,说明油茶林生长受氮限制的情况随着林龄的增长而有所缓解。当 N:K 大于 2.1, K:P 小于 3.4 时,植物的生长主要受钾的限制^[20,25]。油茶不同器官 N:K 平均值介于 0.58~1.15, K:P 平均值介于 4.16~19.08, 说明油茶人工林的生长并没有受钾的影响,而是受到磷的限制,本研究区域内土壤有效磷质量分数均低于 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低质量分数的土壤磷可能是影响油茶生长的第二限制因子。综合以上,影响油茶生长的第一限制因素是氮,其次是磷,因此在土壤管理过程中,可适当增施氮、磷肥,从而促进油茶植株的生长。同时要加强对有机培肥,以提高土壤有机氮质量分数。

3.3 油茶氮、磷、钾储量在不同器官的分配策略

植株氮、磷、钾在不同器官上的分配反映了植物的生理活动和对生境的适应策略^[8]。叶片是绿色植物的光合场所,氮、磷是构成叶绿素 a 和叶绿素 b 的主要成分和遗传物质合成的主要元素,因此植物叶片往往具有较大的氮、磷分配比例。不同年龄油茶叶片平均生物量仅占植株的 15.8%, 而氮、磷的平均分配比例则分别达 31.4%和 28.6%。这也进一步表明营养元素在不同器官的分配不仅与生物量的大小有关,而且与不同组分中氮、磷质量分数有密切关系,油茶叶片氮、磷质量分数也显著高于其他器官。植物的主干和枝条主要负责水分和养料运输,其皮部、木质部与周围环境的响应不显著,因此主干和枝条中的营养元素相对稳定,但随着油茶主干增粗和生物量的增大,氮、磷、钾的分配比例随林龄呈上升趋势。根系是吸收营养元素和水分的器官,将营养元素向上传导至地上部分,以完成植物的生长发育。钾作为调节渗透势的主要物质,在根系中具有最高的分配比例,平均占比达 30.5%。随着油茶年龄的增长,叶片氮的分配比例逐渐升高,同时减小了氮素在根系中的分配,从而优先满足叶片的生理活动及代谢的需求。当油茶年龄达 30 年生时,由于叶片生物量所占比例的减小和叶片营养元素质量分数的降低,氮、磷、钾在叶片中所占的比例也较低。这与雪岭云杉 *Picea schrenkiana* 营养元素在不同器官的分配随生长阶段变化的研究结果相似^[26]。

4 参考文献

- [1] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J Appl Ecol*, 1996, **33**(6): 1441 – 1450.
- [2] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 2 – 6.
HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(1): 2 – 6.
- [3] ASHTON I W, HYATT L A, HOWE K M, *et al.* Invasive species accelerate decomposition and litter nitrogen loss in a mixed deciduous forest [J]. *Ecol Appl*, 2008, **15**(4): 1263 – 1272.
- [4] 于海玲, 李愈哲, 樊江文, 等. 中国草地样带不同功能群植物叶片氮磷含量随水热因子的变化规律[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(11): 2867 – 2874.
YU Hailing, LI Yuzhe, FAN Jiangwen, *et al.* Leaf N and P contents of different functional groups in relation to precipitation and temperature in China Grassland Transect [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35**(11): 2867 – 2874.
- [5] 顾鸿昊, 翁俊, 孔佳杰, 等. 粗放和集约经营毛竹林叶片的生态化学计量特征[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(5): 661 – 667.
GU Honghao, WENG Jun, KONG Jiajie, *et al.* Ecological stoichiometry of *Phyllostachys edulis* leaves with extensive and intensive management [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(5): 661 – 667.
- [6] 高宗宝, 王洪义, 吕晓涛, 等. 氮磷添加对呼伦贝尔草甸草原 4 种优势植物根系和叶片 C:N:P 化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(1): 80 – 88.
GAO Zongbao, WANG Hongyi, LÜ Xiaotao, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on C:N:P stoichiometry in roots and leaves of four dominant plant species in a meadow steppe of Hulunbuir [J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36**(1): 80 – 88.
- [7] SARDANS J, PEÑUELAS J. Trees increase their P:N ratio with size [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2015, **24**(2): 147 – 156.
- [8] 陈婵, 王光军, 赵月, 等. 会同杉木器官间 C, N, P 化学计量比的季节动态与异速生长关系[J]. 生态学报, 2016, **36**(23): 7614 – 7623.
CHEN Chan, WANG Guangjun, ZHAO Yue, *et al.* Seasonal dynamics and allometric growth relationships of C, N, and P stoichiometry in the organs of *Cunninghamia lanceolata* from Huitong [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(23): 7614 – 7623.
- [9] 李红林, 贡璐, 洪毅. 克里雅绿洲旱生芦苇根茎叶 C, N, P 化学计量特征的季节变化[J]. 生态学报, 2016, **36**(20): 6547 – 6555.
LI Honglin, GONG Lu, HONG Yi. Seasonal variations in C, N, and P stoichiometry of roots, stems, and leaves of *Phragmites australis* in the Keriya Oasis, Xinjiang, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(20): 6547 – 6555.
- [10] 尹丹丹, 李珊珊, 吴倩, 等. 我国 6 种主要木本油料作物的研究进展[J]. 植物学报, 2018, **53**(1): 110 – 125.
YIN Dandan, LI Shanshan, WU Qian, *et al.* Advances in research of six woody oil crops in China [J]. *Chin Bull Bot*, 2018, **53**(1): 110 – 125.
- [11] 唐健, 李娜, 欧阳洁英, 等. 油茶苗期生物量积累及营养分配规律研究[J]. 南方农业学报, 2011, **42**(8): 964 – 967.
TANG Jian, LI Na, OUYANG Jieying, *et al.* Mechanism of biomass accumulation and nutrient distribution in *Camellia oleifera* at seedling growth stage [J]. *J Southern Agric*, 2011, **42**(8): 964 – 967.
- [12] 宋贤冲, 唐健, 覃其云, 等. 油茶成熟林生物量积累及营养分配规律[J]. 南方农业学报, 2014, **45**(2): 255 – 258.
SONG Xianchong, TANG Jian, QIN Qiyun, *et al.* Mechanism of biomass accumulation and nutrient distribution in *Camellia oleifera* mature forest [J]. *J Southern Agric*, 2014, **45**(2): 255 – 258.
- [13] 何方, 王义强, 吕芳德, 等. 油茶林生物量与养分生物循环的研究[J]. 林业科学, 1996, **32**(5): 403 – 410.
HE Fang, WANG Yiqiang, LÜ Fangde, *et al.* Biomass accumulation and nutrient cycle in *Camellia oleifera* plantations [J]. *Sci Silv Sin*, 1996, **32**(5): 403 – 410.

- [14] 叶晶, 葛高波, 应雨骐, 等. 青皮竹地上部营养元素的吸收、积累和分配特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(1): 164 – 170.
YE Jing, GE Gaobo, YING Yuqi, *et al.* Absorption, accumulation and distribution of bamboo (*Bambusa textilis*) to the main nutrients [J]. *J Plant Nut Fertil*, 2015, **21**(1): 164 – 170.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2665 – 2673.
REN Shujie, YU Guirui, TAO Bo, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. *Environ Sci*, 2007, **28**(12): 2665 – 2673.
- [17] 秦海, 李俊祥, 高三平, 等. 中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征[J]. 生态学报, 2010, **30**(5): 1247 – 1257.
QIN Hai, LI Junxiang, GAO Sanping, *et al.* Characteristics of leaf element contents for eight nutrients across 660 terrestrial plant species in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(5): 1247 – 1257.
- [18] HE Jinsheng, FANG Jingyun, WANG Zhiheng, *et al.* Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. *Ecology*, 2006, **149**: 115 – 122.
- [19] HAN Wenxuan, FANG Jingyun, GUO Dali, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 2005, **168**: 377 – 385.
- [20] 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.
PI Fajian, YUAN Congjun, YU Lifei, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of plant leaves from the main dominant species of natural secondary forest in the central of Guizhou [J]. *Ecol Environ Sci*, 2016, **25**(5): 801 – 807.
- [21] 阎凯, 付登高, 何峰, 等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(4): 353 – 361.
YAN Kai, FU Denggao, HE Feng, *et al.* Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the Lake Dianchi watershed, southwestern China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(4): 353 – 361.
- [22] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林植物、凋落物与土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, **36**(19): 6188 – 6197.
JIANG Peipei, CAO Yang, CHEN Yunming, *et al.* Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(19): 6188 – 6197.
- [23] 李敬, 胡小飞, 段小华, 等. 植茶年龄对丘陵区茶园土壤和茶树养分含量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2012, **34**(6): 1186 – 1192.
LI Jing, HU Xiaofei, DUAN Xiaohua, *et al.* Effects of planting year on soil and plant nutrients in Hilly tea gardens [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2012, **34**(6): 1186 – 1192.
- [24] 杨亚琴. 不同林龄油茶生理特性及其根区土壤性质研究[J]. 河南农业科学, 2015, **44**(7): 61 – 66.
YANG Yaqin. Research of physiological properties and root-zone soil properties of *Camellia oleifera* at different plantation ages [J]. *J Henan Agric Sci*, 2015, **44**(7): 61 – 66.
- [25] VENTERINK H G M O, WASSEN M J, VERKROOST A W M, *et al.* Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, K-limited wetlands [J]. *Ecology*, 2003, **84**(8): 2191 – 2199.
- [26] 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.
SUN Xuejiao, CHANG Shunli, SONG Chengcheng, *et al.* Age-related N, P, and K stoichiometry in different organs of *Picea schrenkiana* [J]. *Chin J Ecol*, 2018, **37**(5): 1291 – 1298.