

不同树龄咖啡叶片与土壤的 C、N、P 生态化学计量研究

陈肖, 崔现亮, 罗娅婷*, 赵利坤, 李学玲

普洱学院, 云南普洱 665000

摘要: 为了解不同树龄咖啡 C、N、P 生态化学计量特征, 以云南省普洱市思茅区南屏镇某咖啡庄园 1、7、10、20 a 四个树龄咖啡作为研究对象, 测定咖啡叶片和土壤 C、N、P 含量及其化学计量比。结果表明: (1) 咖啡叶片 N、P 含量与树龄呈正比, 随树龄增加而逐渐增加, 与 C 含量呈反比, 随树龄增加逐渐减少; 不同树龄咖啡 N、P 含量差异达到显著水平 ($P<0.05$), 化学计量比 C:N、C:P 均随树龄增长而降低, 其中 C:P 在不同树龄存在极显著差异 ($P<0.01$), 叶片 N:P 阈值分析发现, 叶片 N:P 比在 4 个树龄均小于 14, 说明咖啡的生长主要受 N 元素限制。(2) 不同树龄土壤 SOC 含量存在显著差异 ($P<0.05$), 7 a 的咖啡 C、N、P 含量均为最高; 0~10 cm 土层 C、N、P 含量均值略高于 10~30 cm 土层, 0~10 cm 土层 C:N 均值 9.79 高于 10~30 cm 土层的 6.87; 0~10 cm 土层咖啡 C:P 变化范围为 11.51~46.80, 10~30 cm 土层的为 4.53~20.82, 土层间差异较大; 不同土层 N:P 变化范围分别是 1.00~5.12、0.81~2.08, 相关性表明 N:P 和 P 元素有显著相关性, P 元素是造成 C:N 变化的主要原因。(3) 从相关性分析来看, 咖啡叶片 C 与 N、P 呈显著负相关 ($P<0.05$); 叶片 N 与 C:N、C:P 均有极显著正相关关系 ($P<0.01$), 叶片 P 与 C:P 呈极显著负相关 ($P<0.01$), 不同土层 SOC 和全 N 均呈正相关 ($P<0.05$), 叶片的 C、N、P 与土壤的 SOC、TN 无相关性, 计量比也存在极少的相关性。因此, 咖啡土壤 SOC、TN 和 TP 较低, 主要受 N 养分的限制, 咖啡叶片 N、P 吸收具有协同效应, 且叶片和土壤元素存在广泛的计量耦合关系。

关键词: 生态化学计量学; 咖啡; 叶片; 土壤; 树龄

中图分类号: S571.2 文献标识码: A

Eco-stoichiometric Characteristics of Soil and Leaves Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Different Tree Ages of Coffee

CHEN Xiao, CUI Xianliang, LUO Yating*, ZHAO Likun, LI Xueling

Pu'er University, Pu'er, Yunnan 665000, China

Abstract: In order to understand the C, N and P eco-chemometric characteristics of different tree age groups, the coffee from the Manxieba Xiaobaozi Nanpingzhen a Coffee Estate in Pu'er Simao District was studied in four tree age groups: 1 a, 7 a, 10 a and 20 a, the C, N, and P levels in coffee leaves and soil were determined, as well as the chemometric ratio between them. The N and P content of coffee leaves was proportional to the age of the tree, gradually increasing with the age of the tree, inversely proportional to the C content, gradually decreasing with the age of the tree. The differences in N and P content of coffee reached significant levels ($P<0.05$), and the chemometric ratios C:N and C:P decreased with tree age, among which C:P was significantly different in different tree ages ($P<0.01$). Leaf N:P threshold analysis found that the leaf N:P ratio was less than 14 in all four tree age segments, indicating that the growth of coffee was mainly limited by N elements. There was significant variability ($P<0.05$) in SOC content between tree age groups, with 7 a coffee having the highest C, N and P content. The mean values of C, N and P content were slightly higher for 0-10 cm soils than for 10-30 cm soils and 9.79 for 0-10 cm soils than 6.87 for 10-30 cm soils. The range of C:P variation for

收稿日期 2022-05-27; 修回日期 2022-08-18

基金项目 云南省教育厅科学研究基金资助性项目 (No. K2017052, No. 2021J0521); 云南省大学生创新创业训练计划项目 (No. Y000057-45)。

作者简介 陈肖 (1997—), 女, 本科生, 研究方向: 植物营养与病害控制。*通信作者 (Corresponding author): 罗娅婷 (LUO Yating), E-mail: 411752381@qq.com。

coffee was 11.51–46.80 for 0–10 cm soils and 4.53–20.82 for 10–30 cm soils, with large inter-soil variations. The range of N : P variation was 1.00–5.12 and 0.81–2.08 for different soil layers, respectively. The correlation showed that N : P and P elements were significantly correlated and P element was the main cause of C : N variation. From the correlation analysis, coffee leaf C was significantly negatively correlated with N, P ($P < 0.05$), leaf N was extremely significantly positively correlated with C : N, C : P ($P < 0.01$) and leaf P was extremely significantly negatively correlated with C : P ($P < 0.01$). The SOC and TN of different soil layers were positively correlated ($P < 0.05$), and the C, N, and P of the blade were not correlated with the TOC, TN, and TP of the soil, and the ratio of measurements was rarely correlated. It can be seen from the above that the SOC, TN and TP of coffee soil were relatively low, the soil was mainly limited by N nutrients. In addition, the absorption of N and P by coffee leaves had a synergistic effect, and there was a broad quantitative coupling relationship between coffee leaves and soil elements.

Keywords: ecological stoichiometry; coffee; leaf; soil; tree-age

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.09.008

咖啡 (*Coffea arabica* L.) 为茜草科咖啡属的多年生经济作物, 生长速度快, 产量高, 价值高, 销售渠道广, 与茶叶、可可并称为世界三大饮料作物^[1]。云南省普洱市气候温和, 昼夜温差大, 热量条件好, 全年无霜期长, 雨量适中, 海拔在 317~3370 m 之间, 冬无严寒, 夏无酷暑, 非常适合咖啡生长^[2]。

生态化学计量学特征的研究一般从分子水平、细胞个体水平、群落与生态系统、全球区域尺度几个层次进行。从全球区域尺度来看, 土壤的化学计量比能反映内部重要元素的循环, 一方面有利于确定生态过程对全球变化的响应, 另一方面可以用来判断土壤矿化作用和生物固持作用。植物 N、P 作为敏感限制性元素, 能反映土壤中 N、P 的有效性, 对此研究更深入了解全球碳模拟和宏观生态学的变化^[3-6]。土壤为植物提供了营养物质, 植物叶片的元素大部分来源于土壤, 土壤养分的利用决定了植物元素的浓度, 叶片中养分含量状况能够较好地反映土壤养分供给的能力^[7]。植物和土壤是一体的, 植物中的 N : P 可以预测土壤 N、P 的养分供应情况^[8-9]。AERTS 等^[10]和 CHAPIN 等^[11]的研究也表明 N : P 可作为当前限制性养分判断的指标之一。阈值试验^[11]研究表明, 当叶片 N : P < 14 时, 植物生长主要受 N 限制; 叶片 N : P > 16 时, 植物生长主要受 P 限制; 当 N : P 比值为 14~16 时, 植物生长受 N 和 P 共同限制^[12]。此外, 植物的碳同化速率可以通过叶片的 C : N 和 C : P 来反映^[13]。

在国内, ZHANG 等^[14]最早对生态化学计量学进行了综述, 目前热点研究对象主要是生态系统、植物器官、生长阶段和种群。植物在不同生长阶段时, 会根据植物对环境的适应将有限的养

分资源按照一定比例分配给不同器官, 因此植物形成了一定的生长特征和元素的分配规律。在不同生育阶段, C : N 随着生长呈增加的趋势, 一般来说, 幼龄的植物叶片含氮量最高, 由于植物幼株要生长发育, 需要大量的 N、P, 因此幼龄植株的 N : P 相对较低^[15], 到成熟期达到最高, 造成这种趋势的原因是由于随着植物的衰老, 氮代谢从同化向再分配转化, 其体内 N 的分解速度和释放量相对大于 C, 所以使得比值下降。而 C : N 随着生长呈降低的趋势^[16-17]。对植物器官的研究中主要集中在叶片生态化学计量特征、CNP 元素循环、生物养分限制判断、氮磷添加与叶片相关性、C、N、P 生态化学计量学特征对植物生长的指示性作用、叶片的动态特征、植物叶片与土壤的相关性等方面^[18-25], 其中把气温、水分、海拔、演替阶段作为变量条件来进行研究较多, 而对不同树龄乔木之间研究较少, 有较少学者如叶柳欣等^[26]在研究中表明: 杨梅叶片 C、N 含量与树龄无关。土壤 SOC、TN、TK 含量则随着树龄增长而先降低而后升高, 杨梅生长过程中对 P 较为敏感。邓成华等^[27]和吴家森等^[5]研究中表明: 油茶叶片 C 含量在不同树龄间差异并不显著, 油茶生长的限制元素是 N。马任甜等^[28]在对刺槐的研究中表明: P 相对缺乏, 成为刺槐人工林生长的主要限制因子。

综上所述, 生态化学计量的研究层次范围较广, 在咖啡土壤方面从生态化学计量学方面来研究的还未涉及, 鉴于此, 本研究通过对不同树龄咖啡叶片和土壤生态化学计量特性的研究, 了解咖啡土壤和叶片元素间的相关性、养分循环过程和养分限制关系, 判断限制元素, 有助于系统揭示咖啡在不同生长阶段植物-土壤养分的分布特

征,为咖啡的土壤养分管理提供理论依据,同时为生态化学计量学理论研究提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

研究地点位于云南省普洱市思茅区南屏镇某咖啡庄园(100°57'28"E, 22°39'40"N),面积约20 hm²。海拔1070~1200 m,年均气温17.8℃,年均降雨量1524.4 mm,无霜期318 d,气候类型多样,降雨充沛、纬度较低、温度较高、湿润。土壤类型主要为砖红壤,受生物积累作用呈灰棕色,土体深厚,质地偏沙,土壤偏酸性,分散性大,絮固作用小,耕作容易,宜种性广。

1.2 方法

1.2.1 实验设计与采样 研究的咖啡树龄有1、7、10、20 a四个不同树龄,设4个标准地,测量标准地内咖啡树的株高、径围和冠幅并计算其平均值(表1)。每个标准地内设10 m×10 m的样方4个,共计16个,在每个样方内根据地形用对角线取样法,进行5个点的取样,用土钻在每个样点取咖啡树根际集中区域0~10、10~30 cm两个土层的土样,把相同土层深度同一树龄的土样进行混合,用四分法分取约1 kg,共计32个土样,密封带回实验室;在土样采集的同一咖啡树上,沿咖啡树东南西北4个方位,按照树冠外部和内部剪取无病害成熟叶片30片,共计16个叶片样品,将叶片放入自封袋中带回实验室。

表1 不同树龄咖啡基本情况

Tab. 1 Basic situation of coffee in different tree ages

树龄 Tree age/a	株高 Plant height/cm	径围 Plant diameter/cm	冠幅 Crown width/cm
1	92.4	4.70	64×83
7	196.3	16.50	85×64
10	213.5	19.60	127×117
20	220.4	36.65	154×167

1.2.2 样品处理 (1) 土样处理。将带回实验室的土样除去肉眼可见的砂石、根系、腐烂叶片等杂质,将大块土样碾碎后,于通风的地方平铺风干1周,过80目筛后备用。

(2) 叶片样品处理。将带回的新鲜叶片先用蒸馏水清洗,然后在105℃杀青30 min,最后烘箱80℃烘干至恒重,粉碎机粉碎过100目筛备用。

1.2.3 样品测定^[29] 采用重铬酸钾容量法-外加热法测定植物碳(C)和土壤的有机碳(SOC)含量;用k9840自动凯氏定氮仪进行土壤全氮(TN)的测定;H₂SO₄-H₂O₂消煮,奈氏比色法测植物氮(N);HClO₄-H₂SO₄法测土壤全磷(TP);用H₂SO₄-H₂O₂消煮,钼锑抗比色法测植物中的磷(P)。

1.3 数据处理

所有数据采用SPSS 26软件进行分析。对咖啡叶片的C、N、P和土壤的SOC、TN、TP和C:N、C:P、N:P间的差异显著性采用单因素方差分析。咖啡叶片与土壤C、N、P含量之间的关系采用Pearson相关性分析判断。数据表示均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同树龄咖啡叶片C、N、P含量及化学计量比

由表2可知,叶片C含量介于247.08~388.07 g/kg之间,C含量均值为329.76 g/kg,其中1 a的咖啡叶片C含量最高,随树龄段的增加C含量逐渐减少,20 a的咖啡叶片C含量和其余3个树龄段差异显著($P<0.05$);N含量为2.87~10.13,均值为2.76 g/kg,随树龄的增加,N含量增加,1 a和其他3个树龄段达到显著水平($P<0.05$),7、10、20 a的差异不明显;P含量为0.79~2.70,均值为1.54 g/kg,随着树龄的增加,P含量显著增加,差异达到显著水平($P<0.05$),其中1、7、10、20 a四个树龄差异达到显著水平($P<0.05$);C:N均值为64.66,在不同树龄段差异较大,7 a和10 a无显著差异,和1 a、20 a差异极显著水平($P<0.01$),C:P均值为282.39,和树龄呈反比,随树龄的增加,比值逐渐减小,不同树龄段差异达到极显著水平($P<0.01$);N:P均值为4.69,7 a和其余年龄段差异达到显著水平($P<0.05$)。

2.2 不同树龄咖啡土壤SOC、TN、TP含量及化学计量比

由表3、表4可知,土层深度0~10 cm的土壤SOC含量均值为8.15 g/kg,10~30 cm土层的均值为5.88 g/kg,由于土壤中的SOC主要来源于凋落物的归还,首先富集在表土随时间推移下渗,所以0~10 cm土层的SOC含量略高于10~30 cm土层,除1 a和10 a外,其余差异显著($P<0.05$),

表 2 不同树龄咖啡叶片 C、N、P 含量及化学计量比

Tab. 2 Content and stoichiometric ratio of carbon, nitrogen and phosphorus in coffee leaves of different tree ages

树龄 Tree age/a	C/(g·kg ⁻¹)	N/(g·kg ⁻¹)	P/(g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
1	388.07±10.25 ^{Ab}	2.87±0.12 ^{Aa}	0.79±0.05 ^{Aa}	135.31±2.09 ^{Bc}	492.38±18.19 ^{Dd}	3.64±0.08 ^{Aa}
7	318.74±5.10 ^{Ab}	7.01±1.26 ^{Ab}	0.97±0.02 ^{Ab}	46.88±7.67 ^{Ab}	330.30±0.15 ^{Cc}	7.24±1.19 ^{Ab}
10	365.13±3.85 ^{Ab}	7.01±0.08 ^{Ab}	1.70±0.01 ^{Bc}	52.13±0.01 ^{Ab}	254.41±1.69 ^{Bb}	4.13±0.03 ^{Aa}
20	247.08±31.80 ^{Aa}	10.13±1.11 ^{Ab}	2.70±0.47 ^{Cd}	24.34±0.47 ^{Aa}	91.45±9.60 ^{Aa}	3.75±0.32 ^{Aa}

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

表 3 0~10 cm 土层不同树龄咖啡土壤 SOC、TN、TP 含量及化学计量比

Tab. 3 Content and stoichiometric ratio of carbon, nitrogen and phosphorus in coffee soil of different tree ages in 0~10 cm soil layer

树龄 Tree age/a	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
1	7.54±0.41 ^{Ab}	1.09±0.01 ^{Ab}	0.23±0.02 ^{Aa}	6.95±0.35 ^{Aa}	33.53±0.43 ^{Bb}	4.84±0.30 ^{Bb}
7	9.66±0.05 ^{Ac}	1.34±0.14 ^{Ac}	0.84±0.02 ^{Ca}	7.29±0.73 ^{Bb}	11.51±0.22 ^{Aa}	1.59±0.13 ^{Aa}
10	8.13±0.72 ^{Ab}	0.90±0.13 ^{Aa}	0.18±0.30 ^{Aa}	9.15±0.48 ^{Cc}	46.80±2.60 ^{Cb}	5.12±0.02 ^{Bb}
20	7.26±0.06 ^{Aa}	0.46±0.00 ^{Aa}	0.46±0.01 ^{Ba}	15.78±0.12 ^{Dd}	15.78±0.23 ^{Aa}	1.00±0.02 ^{Aa}

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

表 4 10~30 cm 土层不同树龄咖啡土壤 SOC、TN、TP 含量及化学计量比

Tab. 4 Content and stoichiometric ratio of carbon, nitrogen and phosphorus in coffee soil of different tree ages in 10~30 cm soil layer

树龄 Tree age/a	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
1	2.65±0.13 ^{Aa}	0.47±0.01 ^{Aa}	0.60±0.09 ^{Aa}	5.63±0.15 ^{Aa}	4.53±0.51 ^{Aa}	0.81±0.11 ^{Aa}
7	11.62±0.65 ^{Bc}	1.20±0.18 ^{Aa}	0.60±0.19 ^{Aa}	9.86±0.91 ^{Aa}	20.82±5.30 ^{Ab}	2.08±0.35 ^{Aa}
10	2.98±1.28 ^{Aa}	0.88±0.04 ^{Aa}	0.62±0.95 ^{Aa}	3.33±1.30 ^{Aa}	4.63±1.36 ^{Aa}	1.46±0.16 ^{Aa}
20	6.26±0.12 ^{Ab}	0.73±0.06 ^{Aa}	0.39±0.00 ^{Aa}	8.67±0.50 ^{Aa}	16.05±0.29 ^{Ab}	1.86±0.14 ^{Aa}

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

1 a 的土壤 SOC 含量较低; 0~10 cm 土层 TN 含量均值为 0.95 g/kg, 10~30 cm 土层为 0.82 g/kg, 不同土层间无明显差异, 1、7、10 a 间差异显著 ($P<0.05$); 不同土层间的 TP 含量分别为 0.43、0.56 g/kg, 不同树龄段的 0~10 cm 土层 TP 含量差异显著 ($P<0.05$), 10~30 cm 土层无显著差异; 0~10 cm 土层的 C:N 均值为 9.79, 略高于 10~30 cm, 其中 0~10 cm 土层的不同树龄段存在极显著差异 ($P<0.01$), 10~30 cm 土层无显著差异; C:P 值 0~10 cm 高于 10~30 cm 土层, 差异显著; 0~10 cm 土层的 N:P 高于 10~30 cm 土层, 其中 0~10 cm 土层中 1 a 和 7 a, 10 a 和 20 a 差异达到极显著水平 ($P<0.01$), 10~30 cm 土层无显著差异。

2.3 咖啡叶片 C、N、P 含量和土壤 SOC、TN、TP 含量和化学计量比之间的关系

由表 5 可知, 叶片 C 和 N、P 呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 与 C:N、C:P 呈显著正相关关系 ($P<0.05$); N 与 P 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 C:N、C:P 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$); P 和 C:N、C:P 呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 与 C:P 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), 与 C:N、C:P 呈正相关关系 ($P<0.01$)。

由表 6 可知, 0~10 cm 土层的 C:P 与 N:P 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。SOC 与 TN 呈显著正相关关系 ($P<0.05$), TN 与 C:N 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), TP 与 N:P 呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 与 C:P 呈极显著负相关关系

($P < 0.01$); C : P 与 N : P 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

由表 7 可知, 10~30 cm 土层土壤 SOC 与 TN

呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 与 C : N、C : P 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); C : N 与 C : P、C : P 与 N : P 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。

表 5 叶片 C、N、P 含量及化学计量比之间的 Pearson 相关分析

Tab. 5 Pearson correlation analysis between C, N, P content and stoichiometric ratio of leaves

指标 Index	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	1					
N	-0.744*	1				
P	-0.735*	0.835**	1			
C : N	0.749*	-0.932**	-0.720*	1		
C : P	0.755*	-0.906**	-0.935**	0.901**	1	
N : P	-0.440	0.186	-0.376	-0.307	0.130	1

注：*表示显著相关 ($P < 0.05$)，**表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

表 6 0~10 cm 土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的 Pearson 相关分析

Tab. 6 Pearson correlation analysis between C, N, P content and stoichiometric ratio of 0~10 cm soil

指标 Index	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	C : N	C : P	N : P
SOC	1					
TN	0.767*	1				
TP	0.699	0.390	1			
C : N	-0.522	-0.919**	-0.032	1		
C : P	-0.344	-0.058	-0.879**	-0.287	1	
N : P	-0.216	0.232	-0.792*	-0.570	0.929**	1

注：*表示显著相关 ($P < 0.05$)，**表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

表 7 10~30 cm 土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的 Pearson 相关分析

Tab. 7 Pearson correlation analysis between C, N, P content and stoichiometric ratio of 10~30 cm soil

指标 Index	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	C : N	C : P	N : P
SOC	1					
TN	0.792*	1				
TP	0.080	0.371	1			
C : N	0.837**	0.346	-0.277	1		
C : P	0.854**	0.496	-0.415	0.915**	1	
N : P	0.695	0.615	-0.482	-0.599	0.860**	1

注：*表示显著相关 ($P < 0.05$)，**表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

由表 8 可知, 咖啡叶片的 C 含量与 0~10 cm 土层的 N : P 呈极显著正相关关系 ($r = 0.852$, $P < 0.01$), 与 C : N 呈显著负相关关系 ($r = -0.793$, $P < 0.05$), 与 10~30 cm 土层土壤的各项指标无相关性; 叶片 N 含量与 10~30 cm 土层土壤的 N : P 呈显著正相关关系 ($r = 0.808$, $P < 0.05$); 叶片 P 含量与 0~10 cm 土层土壤的 TN 呈极显著负相关关系 ($r = -0.897$, $P < 0.01$), 与 C : N 呈极显著正

相关关系 ($r = 0.967$, $P < 0.01$); 叶片 C : N 与 10~30 cm 土层的 N : P 呈极显著负相关关系 ($r = -0.846$, $P < 0.01$); 叶片 C : P 与 0~10 cm 土层土壤的 TN 呈显著正相关关系 ($r = 0.726$, $P < 0.05$), 与 0~10 cm 土层的 C : N 呈极显著负相关关系 ($r = -0.857$, $P < 0.01$); 叶片 N : P 与 0~10 cm 土层土壤的 SOC、TP 呈显著正相关关系 ($r = 0.803$ 、 $r = 0.799$, $P < 0.05$), 与 10~30 cm 土层土壤的 SOC、C : P

表 8 叶片和土壤 C、N、P 及计量比的相关性
Tab. 8 Correlation of C, N, P and stoichiometric ratio between leaves and soil

土壤 Soil		叶片 Leaf					
深度 Depth/cm	指标 Index	C	N	P	C : N	C : P	N : P
0~10	SOC	0.104	-0.026	-0.467	-0.198	0.180	0.803*
	TN	0.542	-0.627	-0.897**	0.426	0.726*	0.545
	TP	-0.466	0.323	-0.109	-0.441	-0.790	0.799*
	C : N	-0.793*	0.811	0.967**	-0.652	-0.857**	-0.337
	C : P	0.679	-0.402	-0.138	0.391	0.173	-0.510
	N : P	0.852**	-0.690	-0.459	0.669	0.511	-0.415
10~30	SOC	-0.468	0.346	-0.081	-0.490	-0.131	0.784*
	TN	-0.218	0.326	-0.062	-0.572	-0.249	0.662
	TP	0.516	-0.570	-0.538	0.363	0.416	-0.025
	C : N	-0.648	0.386	0.09	-0.388	-0.147	0.582
	C : P	-0.638	0.601	0.179	-0.615	-0.312	0.754*
	N : P	-0.605	0.808*	0.381	-0.846**	-0.574	0.697

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)，**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

呈显著正相关关系 ($r=0.784$ 、 $r=0.754$, $P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同树龄咖啡叶片 C、N、P 含量及化学计量比

咖啡叶片 C 在 247.08~388.07 g/kg 之间, 均值 329.755 g/kg, 低于全球植物叶片 C 元素含量 462 g/kg, N 含量介于 2.87~10.13 g/kg 之间, 均值为 6.76 g/kg, 明显低于全球尺度 12.20 mg/g, 叶片 P 含量在 0.79~2.70 g/kg 之间, 均值 1.54 g/kg, 接近于全球尺度 (1.8 g/kg) 和略低于中国东部南北森林生态样带优势树种叶片平均 P 含量 (2.0 g/kg)^[30], 叶片中 3 种元素均低的原因与咖啡土壤养分水平偏低有关。

随树龄的增长, 咖啡叶片 C 含量逐渐减少, 因为咖啡成熟期生长基本停滞, 光合作用速率降低, 吸收的营养元素主要转移到生殖器官, 用于种子的发育, 故此时 C 含量最低。随树龄的增加含 N 量增加, 叶片 N 的含量能反映植物生长速率, 叶片含 N 量高, 光合速率快, 生长快, 本研究说明咖啡生长速率较低, 但随树龄的增加, 生长速率加快。咖啡 P 含量随树龄的增加, 含量显著增加, 20 a 的含 P 量最高, 这是由于生长旺盛期植株生长速率较快, 细胞代谢增强, 需要合成大量的蛋白质和核酸^[11], 加上植株生物量增加, 富含 C 的结构物质积累, 造成 N、P 元素含量大幅度上升。

咖啡叶片 C : N 均值为 64.66 g, 高于全球水平 25 g^[31], C : P 均值为 282.39, 高于全球水平 232, 与树龄呈负相关, 生长速率与体内 C : P 呈负相关, N : P 为 4.13~7.24, 均值为 4.69, 低于全球水平, 生长速率理论 (growth rate hypothesis, GRH) 认为, 生长速率的改变引起生物体 C、N、P 化学计量改变, 高生长速率的植物通常具有较低 C : N、C : P 和 N : P, 从而将 P 更多分配到核糖体 RNA, 满足核糖体迅速合成蛋白质以支持快速生长^[6], 咖啡叶片 C : N、C : P 和 N : P 随树龄增大有所降低, 表明在低幼龄林阶段, 咖啡树生长快, 对 C、N、P 养分需求高, 而在成熟林阶段, 咖啡维持相对恒定的慢速生长。大量研究表明, N : P 明显小于 14 时, 主要受 N 元素影响, 其中 7 a 的 N : P 最高, 说明受 N 元素限制最明显。

3.2 不同树龄咖啡土壤 SOC、TN、TP 含量及化学计量比

不同树龄咖啡 0~10、10~30 cm 土层 SOC 含量均值分别为 8.15、5.88 g/kg, 随土层的增加, SOC 含量减少, 是由于 SOC 主要来源于凋落物的归还, 凋落物首先富集在土层表面, 随时间的推移再逐渐淋溶下渗到深层土壤; 不同土层的咖啡 TN 含量均值分别为 0.95、0.82 g/kg, 在土层上无明显差异; 4 个树龄 0~10、10~30 cm 土层 TP 含量在 0.18~0.84、0.47~1.20 g/kg 之间, 不同土层差异不明显, 均低于全球水平 3.90 g/kg^[32], 接近我国土壤 P 含量平均值 0.56 g/kg, 这是因为亚热

带区红壤风化淋溶作用较强,富含的铝、铁、锰氧化物等矿物对P素专性吸附和固定能力强,导致研究区P元素含量少。4个树龄段中,7a的C、N、P含量均为最高,土壤的C、N、P含量主要来源于枯枝落叶的归还和根系的周转,7a的咖啡树正值生长发育的旺盛期,树木冠幅大,叶片多,代谢快,凋落物多。

C:N是土壤质量的敏感指标,土壤中有有机C和N的循环受C:N影响,从相关性上看,C、N均和C:N具有极显著相关性,土壤C:N可以衡量土壤N素矿化能力,与土壤SOC分解速率呈负相关。0~10、10~30cm的咖啡C:N的变化范围分别为6.95~25.78、3.32~9.85,低于中国和世界土壤C:N的平均值(11.90和13.33)^[33],不同树龄咖啡的土壤C:N差异显著。土层0~10、10~30cm的咖啡的C:P变化范围分别为11.51~46.80、4.53~20.82,土层间差异较大,但均低于全国平均水平136,也低于全世界的平均值186。0~10cm土层咖啡土壤N:P变化范围为1.00~4.84,10~30cm土层为0.81~2.08,均低于全国土壤N:P平均值5.20,土层和树龄对N:P均有影响,这可能与咖啡经营过程中,低C投入,高N、高P投入,土壤P素固定有关。咖啡土壤C、N、P含量及相关性研究表明N:P和P元素有显著相关性,说明P元素是造成C:N变化的主要原因。

3.3 咖啡叶片C、N、P含量和土壤SOC、TN、TP含量和化学计量比之间的关系

研究发现叶片C、N、P及化学计量显著大于土壤SOC、TN、TP及化学计量,这与邓成华等^[27]研究的不同树龄的油茶一致,叶片的C、N、P与土壤的SOC、TN、TP无相关性,叶片C:N与0~10cm土层的TN呈显著正相关关系,说明土壤TN对植物的C:N有影响,会直接影响光合效率。相比之下叶片的C、N、P及计量比更受浅土层0~10cm土壤的影响。

参考文献

- [1] 李睿. 普洱县生态咖啡种植管理技术[J]. 南方农业, 2017, 11(29): 11-12.
LI R. Ecological coffee planting management technology in Pu'er County[J]. South China Agriculture, 2017, 11(29): 11-12. (in Chinese)
- [2] 黄家雄, 李贵平. 中国咖啡遗传育种研究进展[J]. 西南农业学报, 2008, 21(4): 1178-1181.
HUANG J X, LI G P. Research progress of coffee breeding in china[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(4): 1178-1181. (in Chinese)
- [3] 魏希杰, 王伟. 我国近五年C、N、P生态化学计量学研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2018, 48(4): 60-65, 36.
WEI X J, WANG W. Research progress of C, N and P ecological stoichiometry in China in the past five years[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2018, 48(4): 60-65, 36. (in Chinese)
- [4] 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 J S, HAN X G. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6. (in Chinese)
- [5] 吴家森, 张勇, 吕爱华, 王增, 刘海英, 汪舍平, 刘娟, 蒋仲龙. 不同林龄油茶叶片与土壤的碳氮磷生态化学计量特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 86-92.
WU J S, ZHANG Y, LYU A H, WANG Z, LIU H Y, WANG S P, LIU J, JIANG Z L. Eco-stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves and soil of *Camellia oleifera* at different age[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019, 39(3): 86-92. (in Chinese)
- [6] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, FAGAN W F, MARKOW T A, COTNER J B, HARRISON J F, HOBBIE S E, ODELL G M, WEIDER L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [7] 程滨, 赵永军, 张文广, 安树青. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
CHENG B, ZHAO Y J, ZHANG W G, AN S Q. The research advances and prospect of ecological stoichiometry[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1628-1637. (in Chinese)
- [8] 刘超, 王洋, 王楠, 王根轩. 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 L, WANG G X. 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. (in Chinese)
- [9] SABINE G. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164: 2432-66
- [10] AERTS R, CHAPIN III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. Advances in Ecological Research, 1999, 30(1): 1-67.
- [11] CHAPIN III S F, MATSON P A, MOONEY H A. Principles

- of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer-verlag, 2002.
- [12] 家伟, 聂富育, 杨万勤, 杨开军, 贺若阳, 庄丽燕, 李志杰, 徐振锋. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(1): 112-118.
JIA W, NIE F Y, YANG W Q, YANG K J, HE R Y, ZHUANG L Y, LI Z J, XU Z F. Ecstoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil aggregates of four plantations in the western margin of Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(1): 112-118. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] ZHANG L X, BAI Y F, HAN X G. Application of N : P stoichiometry to ecology studies[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(9): 1009-1018.
- [15] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 632-638.
HU Y S, ME X Y, LIU Y H. N and P stoichiometric traits of plant and soil in different forest succession stages in Changbai mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 632-638. (in Chinese)
- [16] AYE T M, HEDLEY M J, LOGANATHAN P, LEFROY R. Effect of organic phosphaaate fertilizers and their combination on maize yield and phosphorus avaiability in a Yellow Earth in Myamai[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(2): 111-123.
- [17] 罗艳, 贡璐, 李杨梅. 塔里木河上游绿洲农田不同生育期玉米根茎叶生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 112-119.
LUO Y, GONG L, LI Y M. Stoichiometry characteristics of root, stem and leaf of maize in different growth stages in the upper reaches of the Tarim River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 112-119. (in Chinese)
- [18] 吴统贵, 吴明, 刘丽. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 23-28.
WU T G, WU M, LIU L. Seasonal variations of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of three herbaceous species in Hangzhou Bay coastal wetlands, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 23-28. (in Chinese)
- [19] 胡伟芳, 章文龙, 张林海, 陈晓艳, 林伟, 曾从盛, 全川. 中国主要湿地植被氮和磷生态化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1041-1052.
HU W F, ZHANG W L, ZHANG L H, CHEN X Y, LIN W, ZENG C S, TONG C. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in major wetland vegetation of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(10): 1041-1052. (in Chinese)
- [20] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
ZHANG K, HE M Z, LI X R, TAN H J, GAO Y H, LI G, HAN G J, WU Y Y. Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6538-6547. (in Chinese)
- [21] 严正兵, 金南瑛, 韩延申, 方精云, 韩文轩. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(6): 551-557.
YAN Z B, JIN N Y, HAN Y S, FANG J Y, HAN W X. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Arabidopsis thaliana*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(6): 551-557. (in Chinese)
- [22] 牛得草, 李茜, 江世高, 常佩静, 傅华. 阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化[J]. 植物生态学报, 2013, 37(4): 317-325.
NIU D C, LI X, JIANG S G, CHANG P J, FU H. Seasonal variations of leaf C : N : P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(4): 317-325. (in Chinese)
- [23] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 安树青, 冷欣. 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.
LI Z, HAN L, LIU Y H, AN S Q, LENG X. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(10): 1054-1061. (in Chinese)
- [24] 荣钺钺, 刘京涛, 夏江宝, 陆兆华, 郭彩虹. 莱州湾湿地怪柳叶片 N、P 生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3032-3037.
RONG Q Q, LIU J T, XIA J B, LU Z H, GUO C H. Leaf N and P stoichiometry of *Tamarix chinensis* L. in Laizhou Bay wetland, Shandong province of east China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3032-3037. (in Chinese)
- [25] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.

- TAO Y, ZHANG Y M. Leaf and soil stoichiometry of four herbs in the Gurbantungut desert, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 659-665. (in Chinese)
- [26] 叶柳欣, 张勇, 蒋仲龙, 吕爱华, 王增, 周本智, 王晓晓, 吴家森. 不同林龄杨梅叶片与土壤的碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(3): 454-459.
- YE L X, ZHANG Y, JIANG Z L, LYU A H, WANG Z, ZHOU B Z, WANG X X, WU J S. The stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil and leaves of different ages of *Myrica rubra*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(3): 454-459. (in Chinese)
- [27] 邓成华, 吴龙龙, 张雨婷, 乔航, 刘兴元, 胡亚军, 陈香碧, 苏以荣, 何寻阳. 不同林龄油茶人工林土壤-叶片碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9152-9161.
- DENG C H, WU L L, ZHANG Y T, QIAO H, LIU X Y, HU Y J, CHEN X B, SU Y R, HE X Y. The stoichiometry characteristics of soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus in different stand ages in *Camellia oleifera* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9152-9161. (in Chinese)
- [28] 马任甜, 安韶山, 黄懿梅. 黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2787-2793.
- MA R T, AN S S, HUANG Y M. C, N and P stoichiometry characteristics of different-aged *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2017, 28(9): 2787-2793. (in Chinese)
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-270.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-270. (in Chinese)
- [30] 赵航, 贾彦龙, 王秋凤. 中国地带性森林和农田生态系统C、N、P化学计量统计特征[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 803-814.
- ZHAO H, JIA Y L, WANG Q F. Statistical characteristics of C-N-P stoichiometry in Chinese zonal forest and farmland ecosystema[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 803-814. (in Chinese)
- [31] HAN W X, FANG J Y, GOU D L, ZHAN Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plants species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [32] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 方华军, 孙晓敏. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 581-586.
- REN S J, YU G R, JIANG C M, FANG H J, SUN X M. Stoichiometric characteristics of leaf carbon, nitrogen, and phosphorus of 102 dominant species in forest ecosystems along the North-South Transect of East China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 581-586. (in Chinese)
- [33] 王晶苑, 王绍强, 李勿兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 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.
- WANG J Y, WANG S Q, LI R L, YAN J H, SHA L Q, HAN S J. C : N : P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6): 587-595. (in Chinese)