

康定旭, 陈诗, 欧阳利勋, 等. 云南德宏州油茶土壤和叶片养分含量及生态化学计量特征 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(4): 523-530.
KANG Dingxu, CHEN Shi, OUYANG Lixun, et al. Nutrient contents and ecological stoichiometric characteristics of soil and leaf of *Camellia oleifera* in Dehong Prefecture, Yunnan Province[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(4): 523-530.

云南德宏州油茶土壤和叶片养分含量及生态化学计量特征

康定旭¹, 陈诗¹, 欧阳利勋¹, 饶万邦², 蔺应礼², 伍建榕¹, 马焕成¹

(1 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室/西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224;

2 德宏州梁河县林业和草原局, 云南 德宏 679200)

摘要:【目的】云南德宏州是我国唯一处在热带北缘的油茶种植区, 研究该区域油茶土壤和叶片养分含量及生态化学计量特征, 为油茶科学施肥、精准管理提供理论依据。【方法】采用生态化学计量学的研究方法, 测定并分析油茶土壤和叶片碳、氮、磷、钾含量与化学计量特征。【结果】油茶林地土壤有机碳、全氮、全磷和全钾质量分数分别为 47.77、2.56、0.69 和 5.28 g·kg⁻¹, 土壤有效磷和速效钾质量分数分别为 3.69 和 26.05 mg·kg⁻¹, 土壤有机碳、全氮、全磷的变化具有协同性, 土壤速效钾、有效磷含量直接取决于土壤全钾、全磷含量。油茶叶片碳、氮、磷和钾质量分数分别为 422.09、13.51、0.97 和 4.92 g·kg⁻¹; 氮、磷协同变化, 且均受到土壤磷调控, 油茶生长发育受到氮、磷双重限制, 其中磷为主要限制元素。叶片磷和磷钾比具有内稳态特征, 内稳态指数 H_p 为 5.08, $H_{P:K}$ 为 3.26, 其余元素及化学计量比均不具备内稳态特征。【结论】云南德宏州油茶需持续加强磷元素投入, 同时均衡投入氮、钾元素, 以保障油茶的健康与持续产出。

关键词: 油茶; 生态化学计量; 养分限制; 内稳态特征; 精准施肥

中图分类号: S794.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)04-0523-08

Nutrient contents and ecological stoichiometric characteristics of soil and leaf of *Camellia oleifera* in Dehong Prefecture, Yunnan Province

KANG Dingxu¹, CHEN Shi¹, OUYANG Lixun¹, RAO Wanbang², LIN Yingli², WU Jianrong¹, MA Huancheng¹

(1 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China/ College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Dehong Lianghe County

Forestry and Grassland Bureau, Dehong 679200, China)

Abstract: 【Objective】Dehong Prefecture in Yunnan Province is the only *Camellia oleifera* growing area in the northern tropical margin of China. We conducted the study on soil and leaf nutrient content and ecological stoichiometric characteristics of *C. oleifera* in this area to provide a theoretical basis for scientific fertilization and accurate management of *C. oleifera*. 【Method】We determined and analyzed the contents of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium in soil and leaves of *C. oleifera* by ecological stoichiometry. 【Result】The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in *C. oleifera* forest soil were 47.77, 2.56, 0.69 and 5.28 g·kg⁻¹ respectively, while the contents of available phosphorus and available

收稿日期: 2022-06-15 网络首发时间: 2023-04-24 09:05:56

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230423.1523.003.html>

作者简介: 康定旭, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究, E-mail: 18487364184@163.com; 通信作者: 马焕成, 教授, 博士, 主要从事困难地段植被恢复研究, E-mail: mh@swfu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD1002000); 国家自然科学基金 (31560207); 云南省教育厅科学研究基金 (2021Y240)

potassium were 3.69 and 26.05 mg·kg⁻¹ respectively. The changes of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in soil were synergistic; The contents of available potassium and available phosphorus in soil directly depended on the contents of total potassium and total phosphorus. The contents of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium in *C. oleifera* leaves were 422.09, 13.51, 0.97 and 4.92 g·kg⁻¹ respectively. Nitrogen and phosphorus changed synergistically, and were both regulated by soil phosphorus. The growth and development of *C. oleifera* was limited by nitrogen and phosphorus, of which phosphorus was the main limiting element. The P and P : K in leaves showed homeostasis, H_p was 5.08 and $H_{P:K}$ was 3.26, while the other elements and stoichiometric ratios did not show homeostasis. 【Conclusion】 In order to ensure the health and sustainable production of *C. oleifera* forest, the input of phosphorus should be continuously strengthened, and the input of nitrogen and potassium should be balanced.

Key words: *Camellia oleifera*; Ecological stoichiometry; Nutrient limitation; Homeostasis characteristic; Precision fertilization

植物生态化学计量学研究植物器官元素含量的计量特征及它们与环境因子、生态系统功能的关系,常用于判断植物体和群落的养分限制情况和指导生态系统养分管理^[1]。土壤生态化学计量是土壤有机质组成和养分有效性的重要指标,大量元素碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)是土壤的主要养分成分^[2],土壤有机质的分解与积累可以由C:N、C:P、N:P反映,在一定范围内,N、P的富瘠和有效性可以作为土壤肥力的指标^[3];植物叶片生态化学计量能反映植物生长特性和养分限制状况,特定的植物叶片N:P、N:K、P:K阈值可以判断植物体N、P、K养分限制情况^[4-5];土壤-叶片生态化学计量密切相关,土壤理化性质、养分有效性的改变会影响植物叶片的化学计量特征,进而影响植物的养分吸收和生长发育^[6],植物则通过根系及枯落物将养分归还土壤,改变土壤化学计量特征,影响土壤理化性质^[7];研究土壤和叶片生态化学计量及相关关系,可以指导林地养分管理,为林地经营抚育措施的制定提供参考。

油茶 *Camellia oleifera* 为我国特有的木本油料树种,油茶及其副产品在工业、农业和医药等方面均具有良好的经济、生态和社会效益^[8]。油茶土壤和树体养分高度相关,油茶生长发育需消耗大量的土壤养分,土壤肥力水平高低直接影响油茶的生长、产量和茶油质量^[9],N、P、K等元素的投入对油茶幼林生长、春梢生长、叶绿素积累、花芽分化、油茶果和茶油产量的提高等具有明显的促进作用^[10-13]。截至2019年底,云南省共发展油茶约23万hm²,主要分布于文山和德宏2个州市^[14]。德宏州是我国唯一处在热带北缘的油茶种植区,且坚持以近自然的方式经营管理,人为干扰程度较低,探讨该区域油

茶的土壤-叶片养分含量及生态化学计量特征有助于了解该区域油茶的养分特征和需肥规律,从而为油茶的科学施肥、精准管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况与样品采集

云南省德宏州地处热带北缘,属南亚热带季风气候,立体气候明显,四季不分明,年平均气温18.3℃,年平均降雨1396.2mm。根据德宏州油茶分布情况选取油茶林地,于每个林地内避开林缘等过渡区域,选择坡度、坡向、油茶树体和土壤等基本条件具有该林地代表性的区域设置样地,每个样地设置3个15m×15m的样方,即为3个生物学重复,样地基本情况见表1。在每个样方内选取树势具有代表性的油茶3棵,分别在油茶基部东南西北4个方位距离主干20~30cm处,去除表层枯枝落叶,向下采集0~20cm处的土壤,混合作为土壤样品。于东西南北4个方位的上、中、下层和内、外层分别取成熟叶5片混合作为叶片样品。试验共设置6个样地,每个样地取9个土壤样品、9个叶片样品,共采集54个土壤、54个叶片样品。土壤样品去除大块石砾等杂物过200目筛,自然风干后于实验室中测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有效磷(AP)和速效钾(AK)含量。叶片样品杀青后烘干至恒质量并粉碎,过200目筛,测定C、N、P、K含量。

1.2 元素测定方法

土壤SOC采用重铬酸钾外加热-硫酸亚铁滴定法测定,叶片C含量采用元素分析仪(Elementar vario EL cube, Germerly)测定;土壤和叶片N、P分别采用浓硫酸-高氯酸消解和浓硫酸-过氧化氢消

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of sampling sites

样地 Plot	编号 Number	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	土壤类型 Soil type	pH	林龄/年 Forest age	备注 Remark
平山 Pingshan	1	24°50'58"	98°27'39"	20	1524	红壤	4.7	9	近自然管理
中营 Zhongying	2	24°31'53"	98°15'32"	35	951	红壤	5.1	10	近自然管理
翁冷 Wengleng	3	24°36'8"	98°7'36"	40	1245	红壤	4.9	9	近自然管理
竹坪山 Zhupingshan	4	24°42'21"	98°16'10"	35	1319	红壤	5.0	10	近自然管理
上河东 Shanghedong	5	24°50'29"	98°26'49"	35	1415	黄棕壤	4.6	9	近自然管理
关璋 Guanzhang	6	24°53'56"	98°25'14"	30	1566	黄棕壤	5.1	9	近自然管理

解, 于全自动间断化学分析仪 (Smart Chem 200, AMS Alliance, Rome, Italy) 上测定; K 采用火焰光度法, AK 采用醋酸铵浸提-火焰光度法, 用火焰原子吸收分光光度计 (Agilent 200 美国安捷伦科技有限公司) 测定; 土壤 AP 采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定。

1.3 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 进行统计分析, 土壤和叶片 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 和 P:K 采用质量比表示, 土壤化学计量比中 P、K 以 TP、TK 含量带入计算。使用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 中 Duncan's 法分别检验土壤和叶片 C、N、P、K 含量及化学计量比在样地间的差异显著性 ($\alpha = 0.05$), 采用 Pearson 相关分析判断油茶叶片

与土壤各养分含量及化学计量比之间的关系, 对于 Pearson 相关分析检验结果显著的元素与化学计量比 ($P < 0.05$), 再对其进行土壤养分与油茶叶片对应养分间内稳态关系的拟合, 从而得出叶片养分的内稳态指数 (H), 将稳态模型方程 $y = cx^{\frac{1}{H}}$ 等式两边同时取对数, 使其转化为 $\lg y = \lg c + \frac{1}{H} \lg x$ 并进行拟合, 其中, y 为油茶叶片的养分元素含量, x 为土壤中对应的养分元素含量, c 为常数^[15], 采用 Origin 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 油茶林地土壤和叶片 C、N、P、K 含量及其化学计量比

由表 2 可知, 油茶林下土壤各样地之间仅

表 2 油茶林下土壤 C、N、P、K 含量及其化学计量比¹⁾

Table 2 Soil C, N, P, K contents and their stoichiometric ratios in *Camellia oleifera* forest

样地 Plot	w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)	
	SOC	TN	TP	TK	AP	AK
1	58.62±3.08b	4.03±0.47a	1.32±0.16a	4.38±0.10a	6.85±0.81a	21.51±0.52a
2	36.41±4.15a	1.99±0.14a	0.88±0.24a	7.07±1.52a	4.67±1.26a	34.95±7.60a
3	43.39±2.76a	2.13±0.20a	0.42±0.03a	4.49±0.23a	2.36±0.16a	22.13±1.18a
4	49.13±5.98ab	2.49±0.58a	0.84±0.07a	3.99±0.22a	4.45±0.36a	19.57±1.18a
5	40.81±4.15a	1.78±0.08a	0.20±0.02a	4.59±0.10a	1.28±0.10a	22.59±0.56a
6	58.28±3.89b	2.96±0.23a	0.46±0.05a	7.19±0.51a	2.53±0.23a	35.57±2.55a
均值 Average	47.77±2.19	2.56±0.19	0.69±0.08	5.28±0.35	3.69±0.42	26.05±1.75

样地 Plot	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
1	15.06±1.17a	46.66±4.94a	13.37±0.61a	3.22±0.56a	0.92±0.10a	0.30±0.04a
2	18.79±2.69a	57.27±5.17a	6.51±1.80a	2.89±0.59a	0.33±0.06a	0.12±0.02a
3	20.75±1.21a	105.06±5.79a	9.72±0.69a	5.09±0.25b	0.47±0.03a	0.09±0.01a
4	25.01±6.58a	59.93±8.15a	12.29±1.24a	2.93±0.65a	0.60±0.12a	0.21±0.01a
5	22.93±2.09a	203.98±10.52a	8.86±0.77a	8.84±0.47c	0.39±0.01a	0.04±0.00a
6	19.80±0.53a	128.61±9.77a	8.13±0.18a	6.48±0.40b	0.41±0.01a	0.06±0.01a
均值 Average	20.39±1.29	100.25±11.28	9.81±0.58	4.91±0.45	0.52±0.05	0.14±0.02

1) 同列数据后的不同小写字母表示样地间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among plots ($P < 0.05$, Duncan's test)

SOC 和 N:P 差异显著, 样地 1 和 6 的 SOC 含量显著或不显著高于其余样地, 样地 5 的 N:P 显著高于其余样地。土壤 SOC 均值 $47.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, TN 均值 $2.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, C:N 均值 20.39, C:P 均值 100.25, 均高于中国土壤均值^[16] 及其他油茶种植区; TP 均值 $0.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于江西省^[17] 油茶种植区, 接近中国土壤均值^[16] 及其余油茶种植区; TK 均值 $5.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,

接近江西省永修县^[18] 和河南省新县^[19] 油茶种植区, 远低于中国土壤均值^[20] 及江西省其余油茶种植区; AK 均值 $26.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于其他油茶种植区; AP 均值 $3.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于江西省永修县油茶种植区, 低于中国土壤均值^[21] 和其余油茶种植区; N:P 均值 4.91, 接近中国土壤均值^[16] 及其他油茶种植区 (表 2、表 3)。

表 3 其他油茶种植区和中国土壤平均 C、N、P、K 含量及化学计量比

Table 3 Average soil C, N, P, K contents and stoichiometric ratios of other *camellia oleifera* planting regions and China

区域 Area	w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)		C : N	C : P	N : P
	SOC	TN	TP	TK	AP	AK			
江西省 ^[17] Jiangxi Province			4.14	44.16					
江西省永修县 ^[18] Yongxiu County, Jiangxi Province	22.99	1.79	1.14	3.91	1.59	85.57			
浙江省常山县 ^[22] Changshan County, Zhejiang Province	9.32~16.52				6.25~10.52	92.20~97.50			
河南省新县 ^[19] Xin County, Henan Province		1.22~2.40	0.42~1.01	1.83~11.07	1.31~16.29	57.13~132.44			
亚热带油茶区 ^[23] Subtropical camellia region	17.37	1.52	0.36		5.43		11.23	57.20	5.00
中国土壤均值 ^[16, 20-21] Average value of soil in China	11.20	1.06	0.65	16.6	24.7		11.90	61.00	5.20

由表 4 可知, 油茶叶片各样地间除 K、N:K、P:K 外其余元素与化学计量比差异均不显著, 样地 5 叶片 K 含量显著或不显著高于其他样地, 样地 1、2、4 的 N:K、

P:K 显著或不显著高于其余样地。油茶叶片 C 均值 $422.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 均值 $4.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均低于中国叶片均值^[17, 24] 及其他油茶种植区; N 均值 $13.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,

表 4 油茶叶片 C、N、P、K 含量及其化学计量比¹⁾

Table 4 C, N, P, K contents and stoichiometric ratios in *Camellia oleifera* leaves

样地 Plot	w/(g·kg ⁻¹)				C : N
	C	N	P	K	
1	433.15±26.76a	15.52±0.88a	1.09±0.10a	4.60±0.52a	28.96±1.56a
2	416.60±20.15a	17.51±0.81a	1.15±0.05a	4.48±0.44a	22.72±1.17a
3	443.51±10.55a	12.66±1.19a	0.99±0.03a	5.16±0.42ab	40.05±5.66a
4	435.36±28.34a	13.11±1.32a	0.97±0.05a	3.86±0.51a	30.29±3.28a
5	420.86±13.12a	10.60±0.88a	0.82±0.07a	6.41±0.66b	37.04±4.34a
6	383.08±34.64a	11.65±0.33a	0.82±0.02a	5.03±0.41ab	33.75±4.71a
均值 Average	422.09±9.46	13.51±0.56	0.97±0.03	4.92±0.24	32.14±1.90

样地 Plot	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
	1	430.96±29.00a	92.59±10.95a	14.62±1.16a	3.50±0.31b
2	348.27±9.87a	95.18±13.68a	15.26±0.63a	3.99±0.26b	0.27±0.02b
3	456.37±14.73a	89.47±12.30a	12.90±1.31a	2.46±0.19a	0.20±0.02ab
4	418.76±28.25a	110.29±26.95a	13.42±0.86a	3.61±0.54b	0.26±0.03b
5	472.22±55.13a	70.89±4.58a	12.95±0.40a	1.73±0.21a	0.13±0.02a
6	466.82±43.93a	78.54±4.99a	14.15±0.45a	2.38±0.22a	0.17±0.01a
均值 Average	432.23±15.49	89.49±5.77	13.88±0.36	2.95±0.19	0.21±0.01

1) 同列数据后的不同小写字母表示样地间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among plots ($P < 0.05$, Duncan's test)

P 均值 $0.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均接近中国叶片均值^[17], C:N 均值 32.14, 接近其他油茶种植区; C:P 均值 432.23, 高于江西永修^[18]油茶种植区, 低于亚热带^[23]油茶种

植区; N:P 均值 13.88, 高于浙江常山^[22]油茶种植区, 接近其余油茶种植区; N:K 均值 2.95, P:K 均值 0.21, 两者均高于浙江常山油茶种植区 (表 4、表 5)。

表 5 其他油茶种植区与中国叶片平均 C、N、P、K 含量及化学计量比

Table 5 Average leaf C, N, P, K contents and stoichiometric ratios of other *camellia oleifera* planting regions and China

区域 Area	w/(g·kg ⁻¹)				C : N	C : P	N : P	N : K	P : K
	C	N	P	K					
江西省永修县 ^[18] Yongxiu County, Jiangxi Province	457.20~499.90	17.23~19.80	1.21~1.30		24.46~26.55	368.98~395.68	13.96~16.29		
浙江省常山县 ^[22] Changshan County, Zhejiang Province		11.66	1.65	11.69			7.03	1.00	0.14
亚热带油茶区 ^[23] Subtropical <i>camellia</i> region	503.47	13.49	0.77		39.33	701.86	18.05		
中国叶片均值 ^[17,24] Average value of leaves in China	461.60	20.20	1.21	15.09					

2.2 油茶土壤和叶片 C、N、P、K 含量与化学计量比之间的关系及内稳态特征

相关性分析结果表明, 油茶土壤 SOC 与 TN、TN 与 TP、TN 与 AP、TP 与 AP、TK 与 AK 具有显著正相关关系 (表 6); 油茶叶片 N 与 P 具有显著正相关关系, 其余元素间无显著相关关系 (表 7); 土

壤、叶片各化学计量比间的相关关系由元素间相关关系决定。

油茶叶片和土壤相关性分析结果表明, 叶片 N、P 与土壤 TP、AP 具有显著正相关关系, 叶片 K 与土壤 C:P、N:P 具有显著正相关关系, 土壤和叶片其余各养分元素与各化学计量比间的相关关

表 6 油茶土壤 C、N、P、K 含量及化学计量比之间的相关分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis between C, N, P, K contents and stoichiometric ratios in *Camellia oleifera* plantation soil

土壤 Soil	SOC	TN	TP	TK	AK	AP	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
SOC	1											
TN	0.771**	1										
TP	0.248	0.564**	1									
TK	-0.081	0.069	0.195	1								
AK	-0.081	0.069	0.193	0.893**	1							
AP	0.246	0.566**	0.839**	0.196	0.194	1						
C : N	-0.164	-0.632**	-0.382*	-0.326	-0.324	-0.389*	1					
C : P	0.001	-0.333	-0.778**	-0.110	-0.106	-0.774**	0.287	1				
C : K	0.668**	0.498**	0.237	-0.696**	-0.697**	0.237	0.086	-0.101	1			
N : P	0.064	-0.119	-0.752**	-0.052	-0.050	-0.746**	0.010	0.928**	-0.128	1		
N : K	0.650**	0.859**	0.508**	-0.405*	-0.406*	0.510**	-0.463**	-0.332	0.792**	-0.175	1	
P : K	0.352	0.561**	0.872**	-0.278	-0.281	0.869**	-0.200	-0.708**	0.599**	-0.704**	0.714**	1

1) “*” 表示在 0.05 水平显著相关, “**” 表示在 0.01 水平显著相关 (Pearson 法)

1) “*” indicates significant correlation at the 0.05 level, “**” indicates significant correlation at the 0.01 level (Pearson method)

表 7 油茶叶片 C、N、P、K 含量及化学计量比之间的相关分析¹⁾

Table 7 Correlation analysis between C, N, P, K contents and stoichiometric ratios in *Camellia oleifera* leaves

叶片 Leaf	C	N	P	K	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
C	1									
N	0.102	1								
P	0.322	0.734**	1							
K	0.141	-0.195	-0.272	1						
C : N	0.350	-0.870**	-0.520*	0.134	1					
C : P	0.334	-0.684**	-0.773**	0.127	0.732**	1				
C : K	0.329	0.163	0.163	-0.861**	-0.031	0.012	1			
N : P	-0.196	0.664**	-0.011	-0.037	-0.850**	-0.290	0.115	1		
N : K	0.025	0.687**	0.585**	-0.774**	-0.641**	-0.471*	0.772**	0.395*	1	
P : K	0.116	0.437*	0.669**	-0.828**	-0.374	-0.457	0.872**	-0.056	0.887**	1

1) “*” 表示在 0.05 水平显著相关, “**” 表示在 0.01 水平显著相关(Pearson 法)

1) “*” indicates significant correlation at the 0.05 level, “**” indicates significant correlation at the 0.01 level (Pearson method)

系由元素间相关关系决定(表 8)。

数 H_P 为 5.08, $H_{P:K}$ 为 3.26(图 1), 其余元素与化学

内稳态分析结果表明, 油茶叶片 P 与土壤 TP、

计量比不具备内稳态特征。

叶片 P:K 与土壤 P:K 具有内稳态特征, 内稳态指

表 8 油茶叶片和土壤 C、N、P、K 含量及化学计量比之间的相关分析¹⁾

Table 8 Correlation analysis of C, N, P, K contents and stoichiometric ratios between *Camellia oleifera* plantation soil and leaves

叶片 Leaf	土壤 Soil											
	SOC	TN	TP	TK	AK	AP	C : N	C : P	C : K	N : P	N : K	P : K
C	-0.262	-0.073	0.326	-0.123	-0.124	0.331	-0.134	-0.333	0.085	-0.336	0.087	0.347
N	-0.280	-0.027	0.497**	0.17	0.166	0.488**	-0.036	-0.607**	-0.161	-0.647**	-0.021	0.416*
P	-0.247	-0.049	0.495**	0.108	0.106	0.487**	-0.054	-0.587**	-0.075	-0.650**	0.023	0.401*
K	-0.168	-0.151	-0.266	0.036	0.032	-0.260	-0.031	0.385*	-0.267	0.411*	-0.202	-0.276
C : N	0.069	-0.016	-0.328	-0.193	-0.190	-0.319	-0.138	0.380	0.078	0.432	0.033	-0.241
C : P	0.045	0.027	-0.261	-0.147	-0.143	-0.255	-0.166	0.290	-0.013	0.409	0.032	-0.174
C : K	-0.041	-0.066	0.186	-0.133	-0.133	0.183	0.173	-0.373	0.273	-0.452	0.077	0.252
N : P	-0.101	0.043	0.199	0.113	0.110	0.194	-0.002	-0.253	-0.127	-0.240	-0.003	0.193
N : K	-0.071	0.046	0.457*	0.024	0.025	0.450*	0.049	-0.622**	0.128	-0.683**	0.120	0.436*
P : K	0.001	0.056	0.412*	-0.032	-0.030	0.406*	0.028	-0.561**	0.213	-0.627**	0.153	0.395*

1) “*” 表示在 0.05 水平显著相关, “**” 表示在 0.01 水平显著相关(Pearson 法)

1) “*” indicates significant correlation at the 0.05 level, “**” indicates significant correlation at the 0.01 level (Pearson method)

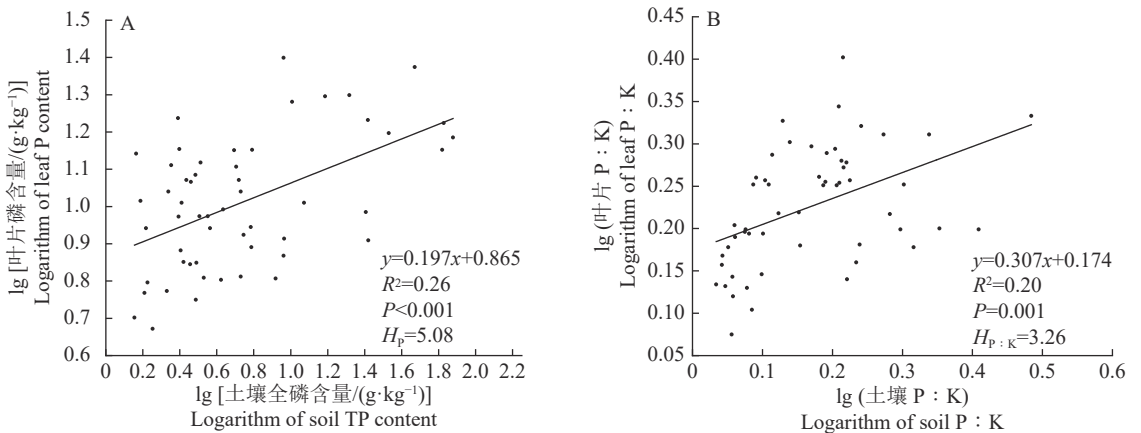


图 1 油茶叶片化学计量内稳态特征

Fig. 1 Stoichiometric homeostasis characteristics of *Camellia oleifera* leaves

3 讨论与结论

3.1 油茶林地土壤 C、N、P、K 含量及化学计量特征

油茶林地土壤 SOC 和 TN 平均含量均高于其他油茶种植区及中国土壤均值,是因为德宏州坚持以近自然的方式经营管理油茶,土壤 SOC 主要取决于土壤有机质含量与凋落物的分解,土壤 N 主要来源于凋落物分解与有机体合成的有机质或大气氮沉降^[25],长期的近自然管理增加了德宏州油茶林地凋落物的积存量与分解量,致使土壤 SOC、TN 得到补充。土壤 TP 含量接近中国土壤平均 TP 和除江西省外的其他油茶种植区均值,AP 含量高于江西永修,低于中国土壤均值和其余油茶种植区,这是因为亚热带区域红壤风化淋溶作用强烈,富含的 Al、Fe、Mn 氧化物等矿物对 P 元素专性吸附和固定的能力强,导致德宏州油茶林地土壤 P 元素含量较少^[26]。土壤 TK 含量接近江西永修和河南新县,远低于中国土壤均值和其他油茶种植区;AK 含量低于其他油茶种植区,说明德宏州油茶林地土壤 K 元素含量相对欠缺。

土壤 C:N 高于中国土壤 C:N 均值及其他油茶种植区,土壤 C:N 是森林有机质分解的预测指标^[27],C:N 低表示土壤中 SOC 分解迅速,土壤 N 元素相对富足,说明德宏州油茶林地土壤 SOC 分解速率相对较慢,TN 相对缺乏。本研究土壤 C:P 高于中国土壤 C:P 均值及其他油茶种植区,土壤 C:P 是土壤 P 素矿化能力的标志,低 C:P 有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放,促进土壤中 AP 的增加;反之,则微生物在分解有机质的过程中存在 P 受限^[28],这说明德宏州油茶林地土壤中微生物对 P 元素的固持能力相对较弱,养分释放能力低,致使 AP 含量相对偏低。土壤 N:P 可用于预测养分的限制状况,本研究的土壤 N:P 为 4.91,接近中国土壤平均值及其他油茶种植区 N:P,为保障油茶林的健康与持续产出,德宏州油茶林地需要加强 N、P 元素投入,以保障林地养分。

3.2 油茶叶片 C、N、P、K 含量及化学计量特征

德宏州油茶叶片 C 和 K 含量均低于中国叶片均值及其他油茶种植区,N 和 P 含量均接近中国叶片均值及其他油茶种植区。叶片 C 含量高表明植物生长速率慢、光合效率低,叶片 N 和 P 含量高表明植物生长速率快、光合效率高^[29],这说明当前德宏州油茶植株生长发育相对缓慢,光合效率低,有机物积累速率低。

叶片 C:N 接近其他油茶种植区的 C:N 均值,C:P 高于江西永修,低于亚热带油茶种植区;叶片

C:N 和 C:P 分别反映了植物吸收利用 N、P 元素并同化 C 的能力,叶片 C:N 和 C:P 的变化主要取决于植物体内 N、P 含量的变化^[30]。说明德宏州油茶植株吸收 N 能力与中国叶片均值及其他种植区域油茶相近,但吸收 P 能力相对较弱,这与林地土壤 N 和 P 缺乏有关。叶片 N:P 高于浙江常山,接近其他油茶种植区,N:P 阈值假说 (N:P threshold hypothesis) 认为,可通过一定的 N:P 阈值判断植物的养分限制情况,Koerselman 等^[31]认为植物叶片 N:P 小于 14 时,植物生长受到土壤中 N 元素的限制;植物 N:P 大于 16 时,植物生长受到土壤中 P 元素的限制;植物 N:P 介于 14~16 时,植物同时受到土壤中 N 元素和 P 元素的限制作用。本研究的 N:P 为 13.88,接近 14,说明德宏州油茶受到 N 和 P 元素的双重限制;N:K 大于 2.1,K:P 小于 3.4 时,植物的生长受 K 元素限制^[32],本研究的叶片 N:K 为 2.95,大于 2.1,K:P 为 4.76,大于 3.4,表明 K 元素虽相对欠缺,但油茶生长发育并未受到 K 元素的限制。

3.3 油茶土壤和叶片 C、N、P、K 含量及化学计量特征

德宏州油茶土壤 SOC 与叶片 C 含量无显著相关关系,说明叶片 C 的主要来源为光合固碳,与土壤 SOC 多寡无关;土壤 SOC 与 TN 含量显著正相关,TN 与 TP 含量显著正相关,但 SOC 与 TP 不存在显著相关关系,即土壤 SOC、TN、TP 中任意元素含量变化,都会引起其他两个元素的变化。阎恩荣等^[33]认为,植物群落中非生物环境 C、N、P 化学计量比值不匹配,会导致 C、N、P 循环途径不同,任一元素的稀缺或过量必将导致其余两元素的积累或消耗。本研究中,TP 的相对欠缺导致了 SOC、TN 的相对积累,因此,油茶林地养分管理中需要注意养分元素的均衡投入;TK 与 AK 含量显著正相关,TP 与 AP 含量显著正相关,表明 AK、AP 含量取决于 TK、TP 含量;土壤 TP、AP 与叶片 N、P 含量显著正相关,且叶片 N 与 P 含量显著正相关,说明叶片 N、P 均受到土壤 P 的调控,因此在经营管理过程中需要注意土壤 P 元素的投入,防止缺 P 限制油茶生长发育与产出。

本研究中,叶片 P 与 P:K 具有内稳态特征,内稳态指数 H_p 为 5.08, $H_{P:K}$ 为 3.26,其他元素及化学计量比不存在内稳态特征。内稳态机制表明,植物所处的外界环境发生变化时,其具有维持自身化学计量特征稳定的能力^[34],限制元素稳定性假说认为,限制元素在植物体内的含量具有相对稳定性^[35],对环境变化的响应较为稳定,说明 P 在德宏州油茶

叶片中具有较高的稳定性, 并且 P 是油茶生长发育的主要限制性元素。

参考文献:

- [1] 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 682-713.
- [2] 贾培龙, 安韶山, 李程程, 等. 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 315-321.
- [3] 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 68-75.
- [4] 余杭, 高若允, 杨文嘉, 等. 干热河谷优势草本植物叶片、根系与土壤碳氮磷含量及其关系[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 727-735.
- [5] 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.
- [6] 张勇, 吴翠蓉, 高海力, 等. 香榧幼龄林叶片与土壤碳氮磷的生态化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 104-110.
- [7] 张子琦, 焦菊英, 陈同德, 等. 拉萨河流域洪积扇不同植被类型的土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6801-6815.
- [8] 吕欢欢, 伍岳峰, 李煜, 等. 普通油茶优良无性系果实性状变异分析及选择[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(5): 519-526.
- [9] 张冬明, 谢良商, 张文, 等. 海南主要油茶林土壤肥力调查与评价[J]. 经济林研究, 2015, 33(1): 79-85.
- [10] 王瑞, 李刘泽木, 张震, 等. 氨基酸态氮对油茶幼苗生长和吸收氮素的影响[J]. 经济林研究, 2022, 40(2): 10-16.
- [11] 胡冬南, 涂淑萍, 刘亮英, 等. 氮、磷、钾和灌水用量对油茶春梢生长的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(4): 148-155.
- [12] 朱丛飞, 华思德, 冯杰, 等. 不同氮磷钾配方施肥对油茶幼苗生长及土壤养分含量的影响[J]. 福建农业学报, 2017, 32(6): 613-618.
- [13] 袁小军, 周幼成, 吴喜昌, 等. 氮磷钾配比施肥对油茶花芽生长及分化的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(3): 1-8.
- [14] 谭鑫, 张升. 发展油茶产业 助力乡村振兴: 油茶产业正逐步成为云南推进乡村振兴的新引擎[N]. 云南日报, 2021-10-19(6).
- [15] 孙俊, 王满堂, 袁景西, 等. 武夷山五种竹子叶、枝、秆碳氮磷化学计量对生长阶段和海拔的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1854-1864.
- [16] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [17] 胡冬南, 刘亮英, 张文元, 等. 江西油茶林地土壤养分限制因子分析[J]. 经济林研究, 2013, 31(1): 1-6.
- [18] 马丽丽, 朱婷, 兰龙焱, 等. 不同品种油茶果实成熟期叶片养分及磷组分的差异[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(11): 82-89.
- [19] 肖斌. 河南新县油茶林土壤养分空间分布特征及养分限制因子研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- [20] 赛牙热木·哈力甫, 宋瑞清, 艾克拜尔·伊拉洪, 等. 察布查尔县土壤碳氮磷钾垂直分布规律研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 582-591.
- [21] LI H, HUANG G, MENG Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China[J]. Plant and Soil, 2011, 349(1): 157-167.
- [22] 王增, 蒋仲龙, 刘海英, 等. 油茶不同器官氮、磷、钾化学计量特征随年龄的变化[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 264-270.
- [23] 邓成华, 吴龙龙, 张雨婷, 等. 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.
- [24] 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.
- [25] 简尊吉, 倪妍妍, 徐瑾, 等. 马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量学特征的纬度变化[J]. 林业科学研究, 2022, 35(2): 1-8.
- [26] 方晰, 陈金磊, 王留芳, 等. 亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(12): 1-12.
- [27] AITKENHEAD J A, MCDOWELL W H. Soil C: N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(1): 127-138.
- [28] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 9-19.
- [29] 喻阳华, 李一彤, 王俊贤, 等. 贵州白云岩地区植物群落叶片-凋落物-土壤化学计量与碳氮同位素特征[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3356-3365.
- [30] 王睿照, 毛沂新, 云丽丽, 等. 氮添加对蒙古栎叶片碳氮磷化学计量与非结构性碳水化合物化合物的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1369-1377.
- [31] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. The Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [32] VENTERINK H O, 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.
- [33] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C : N : P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 48-57.
- [34] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8570-8581.
- [35] HAN W X, FANG J Y, REICH P B, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China[J]. Ecology Letters, 2011, 14(8): 788-796.