

云南澳洲坚果凋落物、修枝和果实收获的养分累积特征研究

杨丽萍, 耿顺军, 贺熙勇, 丁华平, 陈桂良*

云南省热带作物科学研究所/云南省澳洲坚果农业工程研究中心/云南省木本油料技术创新中心, 云南景洪 666100

摘要: 针对云南澳洲坚果生产中钙 (Ca)、镁 (Mg)、锌 (Zn)、硼 (B) 元素养分缺乏的现状, 通过解析树体凋落物、修枝和果实的 Ca、Mg、Zn、B 元素养分累积特征, 为优化澳洲坚果钙、镁、锌、硼养分管理、助力澳洲坚果提质增效生产提供理论依据。2021—2022 年连续 2 a 以澳洲坚果品种 A16 的丰产树为试材, 研究凋落物、修枝和果实收获中干物质量及 Ca、Mg、Zn、B 元素养分含量和累积分配量, 结果表明: 澳洲坚果凋落物、修枝、果实收获干物质量平均为 35.77 kg/株, 其中, 凋落物、修枝、果实收获分别占总干物质量的 19%、32%、49%。不同组织间 Ca、Mg、Zn、B 元素养分含量均存在显著差异, 整体表现为: $Ca > Mg > B > Zn$ 。年平均 Ca、Mg、Zn、B 元素养分累积总量分别为 126.13、23.39、0.25、0.89 g/株; 凋落物、修枝、果实收获的 Ca 元素养分累积分配分别为 45%、48%、7%; Mg 元素养分累积分配分别为 26%、33%、41%; Zn 元素养分累积分配分别为 25%、28%、47%; B 元素养分累积分配分别为 44%、36%、20%。其中, 叶 (落叶和修枝叶) 为 Ca、B 元素养分主要累积分配部位, 而修枝叶和果仁为 Mg、Zn 元素主要累积分配部位。表观养分平衡估算指出, Ca、Mg、Zn、B 元素带走的总养分分别为 45.41、8.42、0.09、0.32 kg/hm², 除去凋落物归还的部分养分, 在没有外源 Ca、Mg 元素养分投入, Zn 和 B 元素养分投入 0.08 kg/hm² 的情况下, 澳洲坚果园 Ca、Mg 和 B 元素养分处于亏缺状态。该研究结果可为澳洲坚果养分优化管理提供依据。

关键词: 澳洲坚果; 凋落物; 修枝; 果实收获; 养分特征; 表观养分平衡

中图分类号: S664; TS255.3

文献标志码: A

Nutrient Accumulation Characteristics from Litter, Pruned Branches and Nuts Harvest of Macadamia in Yunnan Province

YANG Liping, GENG Shunjun, HE Xiyong, DING Huaping, CHEN Guiliang*

Yunnan Institute of Tropical Crops / Yunnan Agricultural Engineering Research Center for Macadamia / Yunnan Technology Innovation Center of Woody Oil, Jinghong, Yunnan 666100, China

Abstract: In view of the deficiency of calcium (Ca), magnesium (Mg), zinc (Zn) and boron (B) in the production of macadamia in Yunnan province, the accumulation characteristics of Ca, Mg, Zn and B in litter, pruned branch and nuts harvest were analyzed to provide a theoretical basis for the optimal management of Ca, Mg, Zn and B nutrients and help the quality and efficiency production of macadamia. In 2021 and 2022, high-yielding trees of macadamia nut variety A16 were used as the test materials to study the quality of dry matter, the content of Ca, Mg, Zn and B nutrients and their cumulative distribution during litter, pruned branch and nuts harvest. The average dry matter weight of litter, pruned branch and nuts harvest of macadamia t was 35.77 kg/plant, among which litter, pruned branch and nuts harvest accounted for 19%, 32% and 49% of the total dry matter weight, respectively. There were significant differences in the content of Ca, Mg, Zn and B nutrients in different tissues, and the overall performance was $Ca > Mg > B > Zn$. The average cumulative amounts of Ca, Mg, Zn and B in 2 years was 126.13, 23.39, 0.25 g/plant and 0.89 g/plant, respectively. The cumulative distribution of Ca and Mg in litter, pruned branch and nuts harvest was 45%, 48% and 7%, and 26%, 33% and 41%, respectively. The cumulative distribution of Zn was 25%, 28% and 47%, and the cumulative distribution of B

收稿日期 2024-04-30; 修回日期 2024-07-22

基金项目 云南省科技厅农业基础研究项目 (No. 202301BD070001-074); 云南省基础研究专项面上项目 (No. 202101AT070146); 云南省“兴滇英才支持计划”项目 (No. XDYC-CYCX-2022-0068)。

作者简介 杨丽萍 (1980—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 热作营养调控与施肥。*通信作者 (Corresponding author): 陈桂良 (CHEN Guiliang), E-mail: chen_guiliang@163.com。

was 44%, 36% and 20%, respectively. Among them, leaves (senescent leaves and pruning leaves) were the main accumulation and distribution parts of Ca and B, while pruning leaves and nuts were the main accumulation and distribution parts of Mg and Zn. The estimated apparent nutrient balance indicated that the total nutrient taken by Ca, Mg, Zn and B was 45.41, 8.42, 0.09 kg/hm² and 0.32 kg/hm². After removing some nutrients returned by litter, in the absence of exogenous Ca and Mg input and the input of Zn and B 0.08 kg/hm², Ca, Mg and B nutrients were deficient in macadamia. The results would provide the basis for nutrient optimization management of macadamia.

Keywords: *Macadamia*; litter; pruned branches; nuts harvest; nutrient characteristics; apparent nutrient balance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.11.013

澳洲坚果 (*Macadamia* spp.) 是山龙眼科 (Proteaceae) 澳洲坚果属 (*Macadamia* F. Muell.) 常绿乔木果树, 原产澳洲, 是澳大利亚本土植物中被驯化为世界性栽培的经济作物, 是世界公认的名贵食用干果和木本油料, 素有“干果皇后”

“世界坚果之王”的美誉^[1]。自 1910 年引入中国以来, 依托云南热区得天独厚的光热资源条件, 澳洲坚果产业在云南得以快速推广^[2]。目前云南省澳洲坚果种植面积占全国的 90% 以上, 占世界种植总面积的 54%, 是世界澳洲坚果种植主产区。2021 年云南省澳洲坚果种植面积达 25.27 万 hm², 其中临沧、普洱、德宏、保山、西双版纳等地的总种植面积达 24.93 万 hm², 成为云南澳洲坚果主产区^[3]。

云南澳洲坚果种植区大多为山地, 施肥管理粗放, 缺乏合理的施肥技术指导, 在生产上过多施用氮、磷、钾肥, 而忽视中、微量元素肥的施用。研究表明, 中、微量元素对植物的生长发育和新陈代谢起着重要调控作用, 对产量和品质的形成有着重要的影响^[4-6]。随着澳洲坚果树的生长, 树体对中、微量元素的需求愈发迫切, 中、微量元素间的科学配比显得尤为重要。云南澳洲坚果叶片和土壤养分调查研究表明, 云南澳洲坚果钙、镁、锌、硼营养总体处于缺乏和潜在缺乏状态^[7]。近年来出现老叶“鱼骨状”黄化的营养失调症状果园逐年增多, 长此必然限制澳洲坚果产业良性发展。因此, 生产中迫切需要制定合理的中、微量元素施用方案。

澳洲坚果树每年的萌芽、开花、抽梢、结果需要消耗树体大量的矿质营养元素, 但主要通过凋落物、果实收获以及修枝等途径从树体移走。澳洲坚果叶片角质层较厚, 凋落后短期很难分解, 雨季容易随着雨水的冲刷而损失, 归还量占凋落物总量的 44%^[8]。澳洲坚果树每年需进行修剪, 修剪的枝条数量庞大, 通常被随意堆放或焚烧,

其移走的养分不能回归土壤。因此, 凋落物、修枝、果实收获, 这 3 种方式是澳洲坚果主要的养分输出方式。张乃文等^[9]指出, 养分输出量是果园实际生产中指导施肥的重要指标, 果园养分输入、输出平衡是维持果园持续生产的基础。

目前已有澳洲坚果凋落物动态、养分归还和果实养分研究的报道^[10-11], 但将凋落物、修枝、果实收获三者有机结合作为养分输出方式的研究尚未见报道。因此, 本研究在云南代表性澳洲坚果园选择主栽品种 A16, 计算树体凋落物、果实收获、修枝中钙、镁、锌、硼养分累积分配特征及养分表观平衡, 以期为澳洲坚果园钙、镁、锌、硼养分优化管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验地概况 试验在云南临沧市镇康县南伞镇澳洲坚果园进行。供试品种 Hidden Valley A16 (简称: A16) 2010 年定植, 栽植密度为 360 株/hm², 株行距 4.0 m×7.0 m。2021—2022 年间平均鲜果产量为 10 800~12 600 kg/hm²。0~20 cm 土壤基本化学性质为: pH 5.1、有机质 24.78 g/kg、全氮 1.13 g/kg、交换性钙 157 mg/kg, 交换性镁 46.83 mg/kg、有效锌 2.08 mg/kg、有效硼 0.86 mg/kg。

1.1.2 样品收集 在果园随机抽取 12 棵树, 分为 4 组, 每组 3 棵, 每组间距 100 m。凋落物 (litter, L) (落叶、落花、落果)、修枝 (prune branches, PB) (修剪的枝、叶)、果实收获 (harvest fruits, HF) (果皮、果壳、果仁) 和总量 (total, T) (凋落物、修枝、果实收获), 在 2021—2022 年间取样。2—6 月, 采用密眼拦截网每月收集凋落物 1 次, 分为落叶、落花和落果; 9 月收获时收集每棵树的鲜果产量, 同时从每棵树的东、南、西、北 4 个方向各采集 10 个成熟果实, 然后混合成一个复合样品。将新鲜的坚果分为果皮和壳果, 称鲜重。

果皮在 70 °C 下烘干, 称干重; 壳果依次在 38、45、60 °C 条件下分别干燥 2 d, 将壳果分离为果壳和果仁, 称干重。按照常规修剪管理, 10 月修剪枝条, 然后分为叶和枝, 分别测量其鲜重和干重 (在 70 °C 下烘干)。试验地采取优化施肥处理, 其 $N-P_2O_5-K_2O$ 化肥用量为 101-61-133 kg/hm², 施肥时期分为 4 个阶段, 即促花肥 (2 月)、膨果肥 (4 月)、壮果肥 (7 月) 以及冬肥 (10 月), 各肥料均在树冠滴水线范围内进行环形均匀撒施。花序抽发期和小果期喷施 0.02% 的硼砂和 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 。

1.2 方法

将干燥后的样品研磨, 称取样品 0.2000 g 加 6 mL HNO_3 , 微波消解仪 (CEM MARS6, 美国) 消解后, 用电感耦合等离子体发射光谱仪 (PerkinElmer Avio500, 美国) 测定组织中的钙 (Ca)、镁 (Mg)、锌 (Zn)、硼 (B) 4 种元

素的浓度。

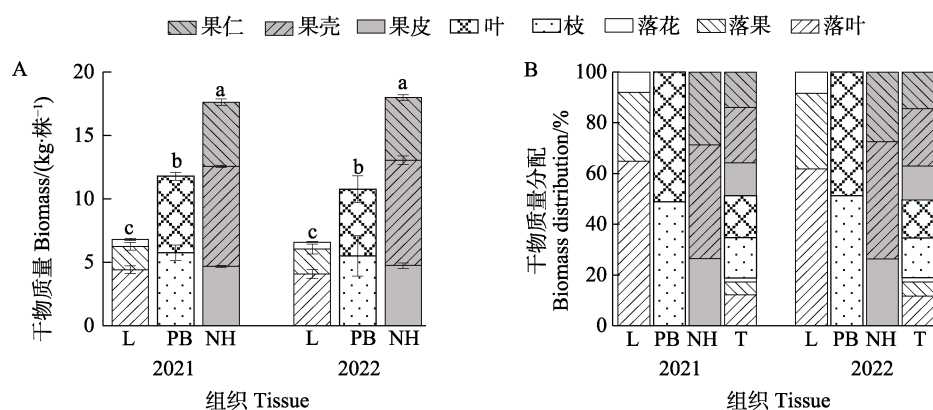
1.3 数据处理

数据采用 Microsoft Office Excel 2020 和 SPSS 19.0 软件进行整理和统计分析, 应用 Origin 2019 软件作图。

2 结果与分析

2.1 澳洲坚果不同组织干物质质量分配

澳洲坚果各组织干物质质量表现为: $L > PB > NH$ (图 1A)。2021—2022 年澳洲坚果干物质质量平均为 35.77 kg/株, 其中, NH、PB、L 平均干物质质量分别为 6.70、11.27、17.80 kg/株, 分别占干物质总量的 19%、32%、49%。2021—2022 年分配中凋落物的落叶、落花、落果干物质质量平均为 12%、2%、5%, 修枝的枝条、叶片平均干物质质量为 16%、16%, 果实的果皮、果壳、果仁平均干物质质量为 13%、22%、14% (图 1B)。



不同小写字母表示在同一年份 L、PB、NH 间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different small letters indicate significant difference among L, PB, NH in the same year ($P < 0.05$).

图 1 澳洲坚果凋落物、修枝和果实收获干物质质量 (A) 及分配特征 (B)

Fig. 1 Biomass accumulation (A) and distribution characteristics (B) of litter, pruned branches and nuts harvest of macadamia

2.2 澳洲坚果不同组织 Ca、Mg、Zn、B 元素养分含量

由表 1 可知, 不同组织 Ca、Mg、Zn 和 B 元素养分含量均存在显著差异, 整体呈现: $Ca > Mg > B > Zn$ 。不同组织 Ca 元素含量整体表现为: 叶片 > 枝条 > 果实; Mg、Zn 元素含量则为: 落花 > 落果 > 果仁 > 叶 > 枝; B 元素含量为: 叶片 > 果皮 > 落果 > 落花 > 果仁 > 枝条; Ca、B 元素含量落叶高于修剪叶, 而 Mg、Zn 元素含量为修剪叶高于落叶。方差分析显示, 年份与组织的交互作用显著影响 Zn 和 B 元素含量, 年际对 Zn 和 B 元素含量有影响, 但对 Ca 和 Mg 元素含量无影响。

2.3 澳洲坚果不同组织 Ca、Mg、Zn、B 元素累积量及分配

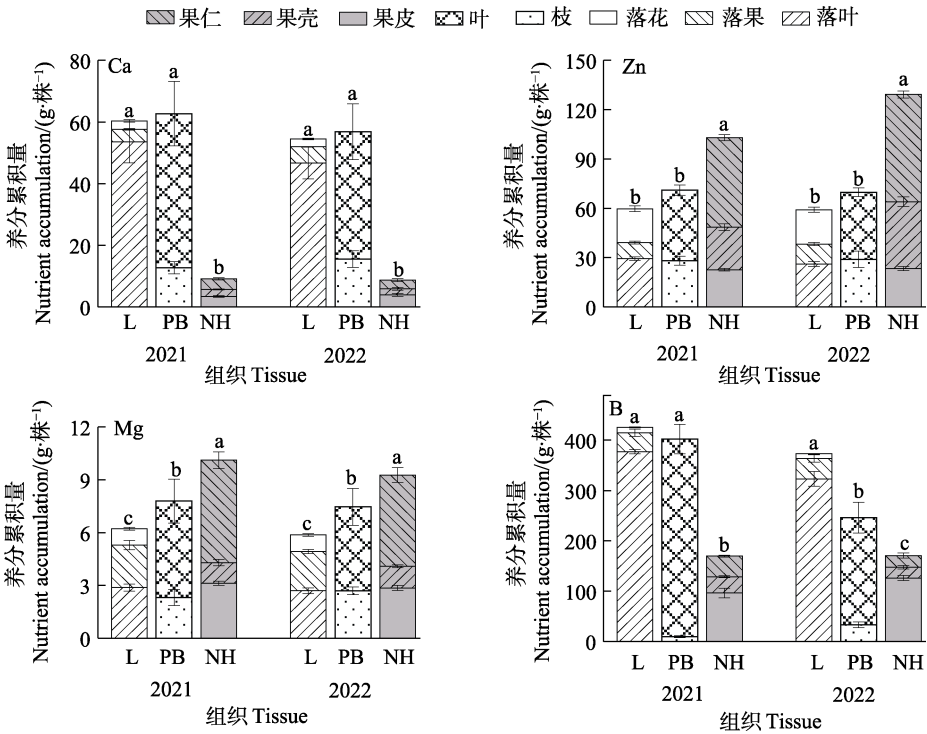
Ca 元素累积量表现为: $L \approx PB > NH$ (图 2)。2021—2022 年澳洲坚果 Ca 元素累积量分别为 132.23、120.03 g/株, 2021 年 Ca 元素累积量高于 2022 年, 这主要是因为 2021 年落叶和修枝叶 Ca 元素累积量高于 2022 年。L、PB、NH 年平均 Ca 元素累积量分别为 57.41、59.76、8.96 g/株, 且均以落叶 (89%)、修枝叶 (80%) 部分 Ca 元素累积量为主 (图 3), 而落花、落果累积量仅为 5.75 g/株。

与 Ca 元素相反, Mg 元素累积量表现为: $NH >$

表 1 澳洲坚果不同组织养分含量特征
Tab. 1 Characteristics of nutrient content in different tissues of macadamia

年份 Year	组织 Tissue	含量 Content				
		Ca/(g·kg ⁻¹)	Mg/(g·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	B/(mg·kg ⁻¹)	
2021	凋落物	落叶	12.10±2.81 ^a	0.65±0.07 ^{de}	6.68±0.43 ^c	85.97±8.24 ^a
		落花	5.01±1.18 ^c	1.73±0.22 ^a	18.00±1.62 ^a	19.40±1.19 ^c
		落果	2.23±0.32 ^d	1.29±0.09 ^b	11.20±1.90 ^b	20.24±7.69 ^c
	修枝	枝	2.18±0.48 ^d	0.41±0.20 ^{ef}	4.84±0.50 ^d	1.67±0.48 ^d
		叶	8.22±3.17 ^b	0.92±0.44 ^{cd}	7.15±1.16 ^c	65.43±11.86 ^b
		果皮	0.73±0.04 ^d	0.66±0.03 ^{de}	4.84±0.34 ^d	20.68±3.98 ^c
	果实	果壳	0.28±0.02 ^d	0.16±0.02 ^f	3.29±0.52 ^d	4.07±0.51 ^d
		果仁	0.69±0.05 ^d	1.12±0.06 ^{bc}	10.73±0.34 ^b	8.15±0.45 ^d
		凋落物	落叶	11.46±2.37 ^a	0.66±0.07 ^d	6.41±0.34 ^{de}
2022	凋落物	落花	4.41±0.73 ^c	1.72±0.22 ^a	21.93±2.74 ^a	16.54±1.53 ^d
		落果	2.66±0.46 ^{cde}	1.15±0.13 ^b	10.69±0.85 ^c	20.66±5.16 ^d
		枝	2.79±0.16 ^{cd}	0.51±0.11 ^d	5.22±0.27 ^e	5.93±0.32 ^e
	修枝	叶	7.94±2.90 ^b	0.91±0.32 ^c	7.90±1.08 ^d	40.44±6.76 ^b
		果皮	0.79±0.07 ^{efg}	0.61±0.04 ^d	4.93±0.35 ^e	26.69±3.00 ^c
		果壳	0.24±0.05 ^g	0.15±0.01 ^e	4.91±0.90 ^e	2.61±0.89 ^e
	果实	果仁	0.61±0.08 ^{fg}	1.08±0.06 ^{bc}	13.25±1.13 ^b	4.62±1.82 ^e
		年份（Y）	NS	NS	*	*
	组织（T）	*	*	*	*	
Y×T	NS	NS	*	*		

注：同列不同小写字母表示相同年份不同组织差异显著 ($P<0.05$)；*、**分别表示差异显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$)；NS 表示差异不显著 ($P>0.05$)。
Note: The different small letters in the same column indicate significant difference among tissues in the same year ($P<0.05$); *, ** indicate significant difference ($P<0.05$) or extremely significant difference ($P<0.01$); NS indicate no significant difference ($P>0.05$).



不同小写字母表示在同一年份 L、PB、NH 间差异显著 ($P<0.05$)。
Different small letters indicate significant difference among L, PB, NH in the same year ($P<0.05$).

图 2 澳洲坚果不同组织钙 Ca、Mg、Zn、B 元素养分累积特征
Fig. 2 Nutrient accumulation characteristics of Ca, Mg, Zn, B in different tissues of macadamia

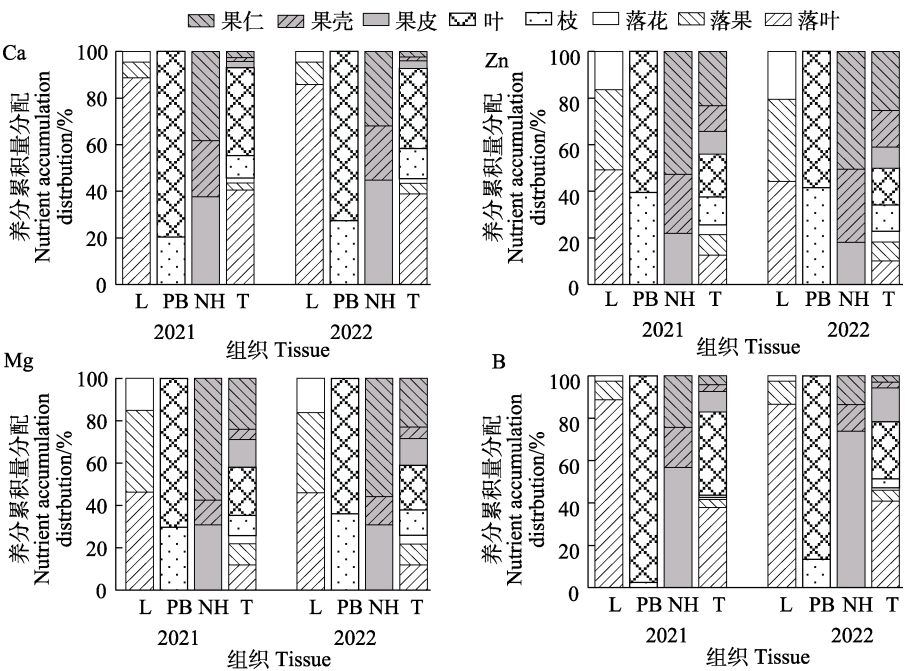


图 3 澳洲坚果不同组织 Ca、Mg、Zn、B 元素养分分配特征

Fig. 3 Nutrient distribution characteristics of Ca, Mg, Zn, B in different tissues of macadamia

PB>L (图 2)。2021—2022 年 Mg 元素累积量分别为 24.00、22.79 g/株, L、PB、NH 年平均 Mg 元素累积量分别为 6.05、7.63、9.72 g/株, 且均以修枝叶 (70%)、果仁 (57%) 部分 Mg 元素累积量为主 (图 3), 而落花落果 Mg 元素累积量仅为 4.75 g/株。

Zn 元素累积量表现为: NH>PB≈L (图 2)。2021—2022 年 Zn 元素累积量分别为 233.60、258.05 mg/株, L、PB、NH 年平均 Zn 元素累积量分别为 59.38、70.41、116.03 mg/株, 且均以落叶 (49%)、修枝叶 (54%)、果仁 (52%) 部分 Zn 元素累积量为主 (图 3)。

B 元素累积量表现为: L≈PB>NH (图 2)。2021—2022 年 B 元素累积量分别为 997.50、790.05 mg/株, L、PB、NH 年平均 B 元素累积量分别为 399.18、324.26、170.34 mg/株, 且均以落叶 (88%)、修枝叶 (93%)、果皮 (66%) 部分 B 元素累积量为主 (图 3)。

2021—2022 年澳洲坚果 L、PB 和 NH 的 Ca 元素累积分配分别为 45%、48%、7%, Mg 元素累积分配分别为 26%、33%、41%; Zn 元素累积分配分别为 25%、28%、47%, B 元素累积分配分别为 44%、36%、20%。其中, 落叶和叶为 Ca 元素主要累积分配部位, 分别占总累积量的 40%、38%, 而叶和果仁为 Mg 元素主要累积分配部位,

分别占总累积量的 22%、24%; 叶和果仁为 Zn 元素主要累积分配部位, 分别占总累积量的 17%、24%; 落叶和叶为 B 元素主要累积分配部位, 分别占总累积量的 39%、33% (图 3)。

2.4 澳洲坚果不同组织 Ca、Mg、Zn、B 元素养分表观平衡

以常规种植密度 360 株/hm² 的澳洲坚果 Ca、Mg、Zn、B 元素带走的总养分分别为 45.41、8.42、0.09、0.32 kg/hm² (表 2); 其中, Ca、Mg、Zn、B 元素修剪带走养分分别为 21.51、2.75、0.03、0.12 kg/hm², 果实收获带走养分分别为 3.22、3.50、0.04、0.06 kg/hm², Ca、Mg、Zn、B 元素凋落物总养分分别为 20.67、2.18、0.02、0.14 kg/hm²。根据表观养分平衡估算, 凋落物每年养分归还量

表 2 澳洲坚果 Ca、Mg、Zn、B 元素养分表观平衡

Tab. 2 Apparent balance of Ca, Mg, Zn and B nutrients of macadamia kg/hm²

元素 Element	养分输出 Output	养分输入 Input		养分平衡 Balance
		肥料输入 Fertilizer input	凋落物归还 Return of litter	
Ca	45.41	0.00	9.08	-36.33
Mg	8.42	0.00	0.96	-7.46
Zn	0.09	0.08	0.01	0.00
B	0.32	0.08	0.06	-0.18

注: -表示养分亏缺, +表示养分盈余。
Note: - indicates nutrient deficit, + indicates nutrient surplus.

按 44% 计算^[8], 在没有外源 Ca、Mg 元素肥投入, Zn 和 B 元素肥投入 0.08 kg/hm² 的情况下, 澳洲坚果园 Ca、Mg 和 B 元素养分长期处于亏缺状态。

3 讨论

3.1 澳洲坚果不同组织的养分吸收特性

Ca、Mg、Zn、B 元素在植物体内含量低, 却是植物正常生长发育所必需的营养元素。钙作为果树生理代谢和发育的主要调控者, 可调节果树的生理活动, 有利于氮、磷的吸收^[12]。由于叶片的蒸腾作用大于果实以及其他幼嫩部位, 因而获得钙的能力较强, 同时, 钙的移动性在韧皮部中相对较差, 难以再运输和分配到果实及新生部位^[13], 因此澳洲坚果 Ca 含量呈现为: 叶片(落叶、叶片)>枝条>果实, 且落叶高于生长中的叶片。Mg、Zn 元素含量表现为: 落花>落果>果仁>叶>枝。缺镁主要症状表现在老叶, 而缺锌症状表现在新叶, 所以生长中的叶片 Mg、Zn 元素含量大于落叶。B 元素含量表现为: 叶片>果皮>落花>果仁>枝条。年际间 Zn 和 B 元素含量波动较大, 这是因为该果园每年叶面喷施 Zn、B 元素肥的缘故。徐晓玲等^[14]的研究结果也表明 Zn 和 B 元素年际间有显著差异, 叶面施硼可以显著提高叶片硼含量, 喷施硼肥没有后效, 缺硼植株需要每年施用。

3.2 澳洲坚果不同组织的养分累积特性

植物生长发育所吸收的养分可以直接反映树体养分需求情况。前人研究大多集中在叶片养分变化规律及 N、P、K 高效施用^[15-16]方面, 而有关 Ca、Mg、Zn、B 元素养分的累积特性方面研究较少。本研究结果表明, 生产 100 kg 澳洲坚果鲜果需要消耗 Ca、Mg、Zn、B 元素养分分别为 25.60、27.77、0.33、2.26 g, 表现为 Ca≈Mg>B>Zn, 这与 NAGAO 等^[17]、杨为海等^[18]和 MOODLEY 等^[19]对澳洲坚果种仁矿质营养的研究结果基本一致。对于澳洲坚果植株而言, Ca、B 元素主要分配在叶片和枝条, 占植株总养分含量的 76%和 71%; Mg 元素分配在枝条, 占植株总养分含量的 39%^[20]。在本研究中, Ca 和 B 元素在凋落物、修枝中占主导, 分别占总累积量的 45%、48%和 44%、36%; Mg 和 Zn 元素在果实中占主导, 分别占总累积量的 41%和 47%。

3.3 Ca、Mg、Zn、B 元素养分需求与科学施肥策略

云南澳洲坚果园土壤酸性, 土壤 pH 4.94, 钙、

镁、锌、硼等离子较为缺乏, 交换性钙、交换性镁、有效锌和有效硼分别为 352.78、85.65、2.14、0.60 mg/kg^[7], 澳洲坚果种植多年未补充中、微量元素, 叶片易出现 Ca、Mg、Zn、B 元素缺乏症状。

近年来, 针对澳洲坚果园 Ca、Mg 元素肥施用效果研究较少, 而在其他作物上的研究较多。陆静^[21]研究表明, 施用石灰后可显著提高贡柑果园的土壤 pH、有效钙含量, 1.0 kg/株提高的幅度最大, 叶面喷施 1.0% 乙酸钙效果最好。尤召阳等^[22]研究表明 CaO 基施明显提高了花生的收获指数, 红壤和沙壤花生栽培中建议基施 CaO。宋洋等^[23]研究表明土壤酸化果园增施碱性镁肥, 能提升土壤 pH, 改善土壤环境, 使土壤呼吸酶活性和有效态矿质元素保持在相对较高的水平, 进而促进根系对其吸收利用, 提升果园产量和品质。王昱桁等^[24]研究 MgCO₃ 对降低土壤酸度、增加土壤交换性镁, 提高叶片镁含量和柑橘果实产量效果优于 MgSO₄。ZHANG 等^[25]研究琯溪蜜柚采用石灰 (CaCO₃ 825 kg/hm²) 配施镁肥 (MgO 297 kg/hm²) 的措施显著提高果实产量、品质和经济效益, 提高土壤 pH、钙镁养分有效性, 降低交换性酸和铝含量。陶晶霞等^[26]研究表明施用钙镁肥时, 不仅需要考虑土壤的供肥能力和植株的养分需求特性, 还要考虑肥料品种、施肥方式和施肥时期等因素。

锌、硼补充方式主要有土施和叶面喷施, 但 HUETT 等^[27]研究表明土壤施锌后 1 a 和 2 a 的叶片锌浓度无影响, 用锌溶液叶面喷施 4 周后, 叶片锌浓度从 12 mg/kg 增加到 26 mg/kg, 建议叶面施锌以增加澳洲坚果叶片的锌浓度。STEPHENSON 等^[28]研究也表明叶面喷施 0.02% 硼溶液能够增产, 提高澳洲坚果出仁率和一级果仁率及平均果仁重。由于微肥适宜到过量范围较窄, 最佳施用量和施用方式需要做田间试验进行验证。

澳洲坚果树体一旦出现缺素症状, 较难恢复。也通过叶片营养诊断参考叶片养分含量进行判别。在养分出现潜在缺乏时, 及时对树体进行营养元素的补充, 效果要更好。在重视氮磷钾肥的同时还应配合钙、镁、锌、硼等中、微量元素, 研究澳洲坚果最佳养分用量、配伍和运筹等管理方案。

参考文献

- [1] MAYER D G, STEPHENSON R A, JONES K H, WILSON K J, BELL D J D, WILKIE J, LOVATT J L, DELANEY K E. Annual forecasting of Australian macadamia crop-inte-

- grating tree census data with statistical climate- adjustment models[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 91(3): 159-170.
- [2] 王守聪. 主要热带作物优势区域布局(2016—2020 年)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- WANG S C. Dominant regional distribution of major tropical crops (2016—2020 year)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016. (in Chinese)
- [3] 李翠萍, 聂艳丽, 李月. 云南省澳洲坚果生产动态变化分析[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(6): 191-194.
- LI C P, NIE Y L, LI Y. Analysis on the dynamic change of *Macadamia* production in Yunnan province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(6): 191-194. (in Chinese)
- [4] 张世祺, 程琛, 林伟杰, 李敬博, 朱东煌, 陈立松, 郭九信, 李延. 琯溪蜜柚园土壤和树体的硼素营养与果实粒化关系分析[J]. *果树学报*, 2019, 36(4): 468-475.
- ZHANG S Q, CHENG C, LIN W J, LI X B, ZHU D H, CHEN L S, GUO J X, LI Y. Analysis of boron nutrition status in soils and trees and its relationship with fruit granulation in Guanximiyu'pomelo[J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(4): 468-475. (in Chinese)
- [5] 杨俊, 伏晓科, 周建华, 解兰, 赵建聪, 张彬, 刘明洁. 树冠喷施硼肥和钙肥对‘黄金蜜柚’果实品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2018, 47(5): 5-8, 10.
- YANG J, FU X K, ZHOU J H, XIE L, ZHAO J C, ZHANG B, LIU M J. Effects of foliar application of boron and calcium on fruit quality of Huangjinmoyou pumelo[J]. *South China Fruits*, 2018, 47(5): 5-8, 10. (in Chinese)
- [6] 陈珍, 曹帮华, 耿颖, 刘炜, 曹晓楠, 赵钰琪, 王可欣, 李圣波, 诸葛绪钦. 中微量元素钙、镁、硼叶面肥对皱皮木瓜果实产量和品质的影响[J]. *果树学报*, 2023, 40(4): 724-734.
- CHEN Z, CAO B H, GENG Y, LIU W, CAO X N, ZHAO Y Q, WANG K X, LI S B, ZHUGE X Q. Effect of foliar fertilizer on fruit yield and quality of *Chaenomeles speciosa* (Sweet) Nakai based on principal component analysis[J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(4): 724-734. (in Chinese)
- [7] 杨丽萍, 岳海, 何双凌, 陶亮, 贺熙勇. 云南澳洲坚果园土壤和叶片养分评价[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(8): 2269-2274.
- YANG L P, YUE H, HE S L, TAO L, HE X Y. Evaluation of soil and leaf nutrients in *Macadamia* orchards in Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(8): 2269-2274. (in Chinese)
- [8] 谭秋锦, 陈海生, 王文林, 黄锡云, 许鹏, 郑树芳, 汤秀华. 不同林龄澳洲坚果园凋落物与土壤养分的关系[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(9): 1703-1707.
- TAN Q J, CHEN H S, WANG W L, HUANG X Y, XU P, ZHENG S F, TANG X H. Relationships between litter and soil nutrients in different-aged *Macadamia ternifolia* orchard[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(9): 1703-1707. (in Chinese)
- [9] 张乃文, 董彩霞, 徐阳春. 梨树修剪枝和果实从树体移走的养分研究[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(4): 37-42.
- ZHANG N W, DONG C X, XU Y C. Nutrient amounts removed by the pruning branches and the fruit harvest from the pear tree[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(4): 37-42. (in Chinese)
- [10] 周会平, 魏丽萍, 谢江, 陈国云, 徐睿. 西双版纳橡胶林、澳洲坚果林凋落物动态[J]. *安徽农业大报*, 2017, 44(3): 422-428.
- ZHOU H P, WEI L P, XIE J, CHEN G Y, XU R. Litter dynamics of rubber plantation and *Macadamia* plantation in Xishuangbanna[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(3): 422-428. (in Chinese)
- [11] 任二芳, 牛德宝, 刘功德, 罗小杰, 艾静汶, 黄欣欣. 澳洲坚果仁营养成分分析与其加工副产物的综合利用研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(6): 194-198.
- REN E F, NIU D B, LIU G D, LUO X J, AI J W, HUANG X X. Study on analysis of nutritional components of *Macadamia* nuts and comprehensive utilization of its processing by-products[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(6): 194-198. (in Chinese)
- [12] 刘会超, 姚连芳, 韩振海. 钙对苹果果实发育及果肉细胞超微结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004(4): 419-423, 428.
- LIU H C, YAO L F, HAN Z H. Effect of calcium on development and cell ultrastructure of apple fruit[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004(4): 419-423, 428. (in Chinese)
- [13] 鲁剑巍, 陈防, 王富华, 刘冬碧, 万运帆, 余常兵, 胡芳林, 王明锐, 王运华. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 390-394.
- LU J W, CHEN F, WANG F H, LIU D B, WANG Y F, YU C B, HU F L, WANG M R, WANG Y H. Study of classification of the soil nutrient status of *Citrus* orchard in Hubei province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 390-394. (in Chinese)
- [14] 徐晓玲, 徐奕言, 彰雪清, 唐绍文. 国内澳洲坚果叶片营养诊断中几个基本问题的研究[J]. *广西热作科技*, 1996(3): 1-6.
- XU X L, XU Y Y, ZHANG X Q, TAN S W. Study on some basic problems in the nutritional diagnosis of *Macadamia* nut leaves in China[J]. *Guangxi Hot Crop Science and Technology*, 1996(3): 1-6. (in Chinese)
- [15] 韩树全, 范建新, 王代谷, 雷朝云, 刘荣, 吴小波, 黄海.

- 澳洲坚果生育期内叶片矿质营养元素及其变化[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(23): 8-10, 52.
- HAN S Q, FAN J X, WANG D G, LEI C Y, LIU R, WU X B, HUANG H. Mineral nutrient elements and their changes in *Macadamia* nut leaves during growth period[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(23): 8-10, 52. (in Chinese)
- [16] ZHAO X, DONG Q Q, NI S B, HE X Y, YUE H, TAO L, NIE Y L, TANG C X, ZHANG F S, SHEN J B. Rhizosphere processes and nutrient *Management* for improving nutrient-use efficiency in macadamia production[J]. Hortscience, 2019, 54(4): 603-608.
- [17] NAGAO M A, HIRAE H H, STEPHENSON R H. *Macadamia* cultivation and physiology[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1992, 10(5): 441-470.
- [18] 杨为海, 张明楷, 邹明宏, 曾辉, 万继锋, 张汉周, 陆超忠. 澳洲坚果种仁矿质营养特性研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(11): 1959-1964.
- YANG W H, ZHANG M K, ZOU M H, ZEN H, WANG J F, ZHANG H Z, LU C Z. Characteristics of mineral nutrition of *Macadamia* kernel[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(11): 1959-1964. (in Chinese)
- [19] MOODLEY R, KINDNESS A, JONNALAGADDA S B. Chemical composition of edible macadamia nuts (*Macadamia integrifolia*) and impact of soil quality[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2007, 42(14): 2097-2104.
- [20] ZHAO X, DONG Q Q, LYU Y, HE X Y, YUE H, YANG L P, TAO L, GONG L D, ZHENG H X, WEN S J, LAMBERS H, SHEN J B. LAMBERS H, SHEN J B. Biomass partitioning and ionomics of *Macadamia* with high manganese and low phosphorus concentrations[J]. Functional Plant Biology, 2023, 50(7): 559-570.
- [21] 陆静. 三种钙肥对贡柑裂果、果皮钙含量和品质的影响研究[J]. 广西农学报, 2021, 36(2): 28-32.
- LU J. Effects of three kinds of calcium fertilizers on calcium content and quality of cracked fruit and pericarp of *Citrus Gongga*[J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2021, 36(2): 28-32. (in Chinese)
- [22] 尤召阳, 杨莎, 张佳蕾, 郭峰, 李新国, 王建国, 万书波. 钙肥类型及施用时期对花生干物质积累量和产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(2): 359-367.
- YOU Z Y, YANG S, ZHANG J L, GUO F, LI X G, WANG J G, WAN S B. Effects of calcium fertilizer types and application periods on growth, dry matter accumulation and yield of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45(2): 359-367. (in Chinese)
- [23] 宋洋, 刘冬峰, 赵泉, 郭秀珠, 李发勇, 林绍生. 不同镁肥对柚园土壤和树体营养的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(6): 1275-1278, 1284.
- SONG Y, LIU D F, ZHAO Q, GUO X Z, LI F Y, LIN S S. Effects of different magnesium fertilizers on soil and tree nutrition in pomelo orchard[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2022, 63(6): 1275-1278, 1284. (in Chinese)
- [24] 王昱桁, 康福蓉, 熊华烨, 赵环宇, 罗雅尹, 易时来, 杨云洪, 石孝均, 张跃强. 三种镁肥在酸性土壤柑橘园中的施用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 1673-6257.
- WANG Y H, KANG F R, XIONG H Y, ZHAO H Y, LUO Y Y, YI S L, YANG Y H, SHI X J, ZHANG Y Q. Effects of three magnesium fertilizers application on *Citrus* orchard in acid soil[J]. Chinese Soil and Fertilizer 2023(4): 1673-6257. (in Chinese)
- [25] ZHANG S W, YANG W H, MUNEER M A, JI Z J, TONG L, ZHANG X, LI X X, WANG W Q, ZHANG F S, WU L Q. Integrated use of lime with Mg fertilizer significantly improves the pomelo yield, quality, economic returns and soil physicochemical properties under acidic soil of Southern China[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 290: 110502.
- [26] 陶晶霞, 王玉雯, 李晓娜, 张利军, 张建翔, 张华, 廖文强, 姜玉英, 吴良泉, 李延, 郭九信. 琯溪蜜柚地上部新生组织干物质质量和钙镁养分累积特征[J]. 果树学报, 2024, 41(1): 101-112.
- TAO J X, WANG Y W, LI X N, ZHANG L J, ZHANG J X, ZHANG H, LIAO W Q, JIAN Y Y, WU L Q, LI Y, GUO J X. Accumulation dynamics of biomass Ca and Mg nutrient in the aboveground newborn organs of Guanximiyou pomelo tree[J]. Journal of Fruit Trees, 2024, 41(1): 101-112. (in Chinese)
- [27] HUETT D O, VIMPANY I. An evaluation of foliar nitrogen and zinc applications to *Macadamia*[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2006, 46(10): 1373-1378.
- [28] STEPHENSON R A, GALLAGHER E C. Effects of foliar boron sprays on yield and quality of *Macadamia* nuts[J]. Scientia Horticulturae, 1987, 32(1/2): 97-103.