

无患子媛华不同物候期养分需求特征研究

刘俊涛¹, 陈义勇¹, 王立宪¹, 任立文¹, 曹秋丽¹, 王冕之¹, 郑玉琳¹, 翁学煌²,
赵鹏丽¹, 贾黎明^{1*}

1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 福建源华林业生物科技有限公司, 福建建宁 354500

摘要: 为了解无患子媛华无性系原料林叶片矿质元素在不同关键物候期动态变化规律, 揭示该无性系养分需求特征, 为科学制定营养管理制度提供理论依据。以福建省建宁县树龄 5、6、7 a 的无患子媛华无性系原料林为研究对象, 测定展叶期、花序抽生末期、花期末、果实膨大初期、果实转色期、果实成熟期 N、P、K、Ca、S、Mg、Fe、Zn、B 等含量指标。无患子媛华无性系原料林不同关键物候期叶片中 N、P、K、Ca、Mg 含量总体呈先降低、再上升、后降低趋势, 均在果实膨大初期达到最高; N 和 P 的含量在花序抽生末期和果实膨大初期之间存在显著差异, 其 K 含量在果实膨大初期显著高于其他关键生育期, 且在其余生育期之间无显著差异, 而 Ca 含量和 Mg 含量在展叶期和果实膨大初期存在显著差异 ($P<0.05$), Fe、B 含量呈先上升后降低趋势, Fe 含量在果实转色期显著高于其余生育期, B 含量在花期末急剧降低, 且显著低于其余生育期 ($P<0.05$), Zn 含量和 S 含量全年总体无明显变化。3 个树龄叶片中 N 含量和 K、P、Mg 含量分别呈显著正相关, Ca 含量和 K、Fe 含量分别呈显著正相关, S 含量和 Zn 含量呈显著负相关, Zn 含量和 S、B 含量分别呈显著负相关。坐果期 (6—7 月底) 可作为叶片营养诊断的适宜时期; 施肥应考虑各元素间的关联; 在花序抽生末期时, 此时应及早追施 N、P 和 B 肥; 在坐果期要适量追肥, 同时结合追施微肥。

关键词: 无患子; 无性系; 叶片矿质元素; 物候期; 动态变化

中图分类号: S723.7 文献标识码: A

Characteristics of Nutrient Demand of *Sapindus mukorossi* Yuanhua in Different Phenological Periods

LIU Juntao¹, CHEN Yiyong¹, WANG Lixian¹, REN Liwen¹, CAO Qiuli¹, WANG Mianzhi¹, ZHENG Yulin¹,
WENG Xuehuang², ZHAO Pengli¹, JIA Liming^{1*}

1. Key Laboratory of Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Fujian Yuanhua Forestry Biotechnology Co., Ltd., Jianning, Fujian 354500, China

Abstract: In order to understand the dynamic changes of leaf mineral elements in different key seasonal periods of *Sapindus* Yuanhua clonal raw material forests, and to reveal the characteristics of nutrient demand of this clonal lineage, we provided a theoretical basis for the scientific development of nutrient management system. The 5 a, 6 a and 7 a years old *Sapindus* Yuanhua clonal forests in Jianning county, Fujian province were used for the study, and the contents of N, P, K, Ca, S, Mg, Fe, Zn and B were measured at the leaf development stage, the end of inflorescence, the end of anthesis, the beginning of fruit expansion, the fruit color change stage and the fruit ripening stage. The contents of N, P, K, Ca and Mg in the leaves of Yuanhua clonal forest showed a general trend of decreasing, then increasing and then decreasing in different critical periods, and all of them reached the highest in the early stage of fruit expansion. There were significant differences in the contents of N and P in the end of inflorescence and the early stage of fruit expansion. K content at the beginning of fruit expansion was significantly higher than the other key reproductive periods, and there was no sig-

收稿日期 2022-11-01; 修回日期 2023-01-05

基金项目 国家科技基础资源调查专项 (No. 2019FY100803)。

作者简介 刘俊涛 (1992—), 男, 博士研究生, 研究方向: 能源林养分高效利用与调控机制。*通信作者 (Corresponding author): 贾黎明 (JIA Liming), E-mail: jlm@bjfu.edu.cn。

nificant difference between the rest of the reproductive periods, while Ca content and Mg content were significantly different between the leaf expansion period and the beginning of fruit expansion ($P < 0.05$). Fe and B content showed a tendency of increasing and then decreasing, with Fe content being significantly higher than that of the rest of the reproductive periods during the fruit color change period and B content decreasing dramatically at the end of the flowering period, and being significantly lower than that of the rest of the reproductive periods ($P < 0.05$). Zn and S contents did not change significantly throughout the year. The N, K, P and Mg contents of leaves in the three stand ages were significantly and positively correlated. Ca, K and Fe contents were significantly and positively correlated. S and Zn contents were significantly and negatively correlated, and Zn content was significantly and negatively correlated with S and B contents, respectively. The fruit-sitting period (June to the end of July) can be a suitable period for leaf nutritional diagnosis. Fertilizer application should consider the correlation between elements. At the end of inflorescence extraction, N, P and B fertilizers should be applied early. In the fruit-sitting period, an appropriate amount of fertilizer should be applied, combined with the application of micronutrient fertilizer at the same time.

Keywords: *Sapindus mukorossi*; clone; leaf mineral elements; phenological period; dynamic change

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.03.011

无患子 (*Sapindus mukorossi* Gaertn.) 为无患子科无患子属落叶乔木, 种植范围广泛, 栽培历史悠久^[1-2]。无患子春季花期, 夏秋果期, 具有较高的利用价值, 其果皮富含皂苷约 20%, 同时也是集生物质能源、生物化工、绿化美化等功能于一体的多功能原料树种^[3]。无患子主要分布于我国淮河流域以南地区, 集中种植于我国的东部和南部以及西南部地区, 其在印度和美国等国家也有分布^[4-5]。近年来, 无患子产业在我国发展迅速, 仅福建省种植面积达到 2 万 hm^2 。从福建省众多优良品种中选育出媛华新品种, 正在逐渐发展成为福建建宁地区的主推品种。该品种具有高产、稳产、抗病虫等特点, 也能够自然矮化, 深受种植企业和种植户的欢迎, 拥有广阔的市场前景。但在实际生产上对其营养特性的了解较少, 不利于林地施肥管理。叶片作为树体重要的营养器官, 对树体营养状况反应敏感, 叶片分析诊断被开发为诊断树木营养状况的手段^[6-7]; 近年来, 叶片营养诊断被确定为未来施肥需求的推荐方法^[8-11]。因此, 探讨无患子无性系叶片的养分含量变化规律并进行养分诊断, 对制定科学施肥技术, 从而提高其产量和质量具有重要的指导意义。

叶片矿物质营养元素对果树生长、产量和果实品质具有重要的作用^[7]。植物叶片矿物质元素含量的吸收和利用主要受树木本身 (反映果树树体的营养状况) 以及外部环境 (果树林地土壤的供肥能力) 的影响, 是果树养分管理的重要依据^[12-13]。国内外学者在经济林关键物候期营养需求规律做了大量的研究, 主要集中在苹果 (*Malus pumila* Mill.)、蓝莓 (*Vaccinium* spp.)、芒果 (*Mangifera*

indica L.)、脐橙 [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck]、葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 和板栗 (*Castanea mollissima*) 等果树^[14-19]。由于不同品种和不同关键时期的营养特性不同, 需肥规律也存在明显差异^[20-22]。康专苗等^[16]研究认为, 宜在每年 1 月采集第 1 蓬叶进行帕拉英达芒果叶片营养诊断。袁紫倩等^[23]研究薄壳山核桃马汉叶片主要矿质营养元素生育期动态变化特征, 结果表明, 叶片中 N 与 P 含量间呈极显著正相关, N 与 Ca 和 P 与 Ca 含量间呈极显著负相关, P 与 K 呈显著正相关, 叶片对矿质营养元素的吸收具有明显季节性, 其中开花授粉期对 N、P、K、Cu 的需求量较大, 坐果期和果实膨大期对 N、P、K 的需求量较大。而板栗在开花授粉期对 N、P、K、Ca、B 与果实膨大期对 N、P、K、Ca 需求量较大; 果实发育期间板栗对 Fe 和 Mn 的需求有持续增加的趋势; 不同物候期板栗对 Cu 和 Mn 的需求量变化较小^[19]。九叶青花椒叶片中大、中量元素 N 和 P、K 之间均呈极显著正相关, Ca 和 N、P 之间均呈极显著负相关。N 和 K 之间呈显著正相关关系, 同时建议施肥以 N、K、Ca、P 肥为主, B、Zn、Mg 肥为辅, 在花椒开花授粉和坐果期适当补充追肥^[24]。

近年来, 国内外学者对无患子原料林的研究主要在品种选育、林产品产量提升、修枝整形等方面^[25-28]。目前国内对无患子无性系叶片矿质元素含量的研究鲜有报道, 导致不同树龄无患子无性系的叶片营养诊断时期不明, 因此难以准确地诊断无患子无性系营养亏缺程度, 致使福建建宁地区主产区无患子原料林的施肥管理带有盲目性, 未做到科学配方施肥, 因此, 有必要探究无

患子无性系关键物候期营养需求规律。本研究以不同树龄（5、6、7 a）无患子媛华原料林为研究对象，对叶片养分进行不同关键时期跟踪采样，探究无患子媛华不同物候期叶片矿物质元素动态变化规律以及养分需求规律，以期为无患子养分管理和合理施肥管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验地点设在有“中国无患子之乡”之称的福建建宁，于 2021 年建成无患子国家级种质资源库。属中亚热带海洋性季风气候，又兼有大陆性山地气候特点，年均气温 17.0 ℃，年均降雨量 1792 mm，多集中在春夏两季，年均相对湿度 84%。试验地土壤为砂质黏壤土，土壤养分有机碳含量为 7.75 g/kg，全氮含量为 1.40 g/kg，全磷含量为 0.36 g/kg，全钾含量为 27.95 g/kg，速效钾含量为 48.16 mg/kg，有效磷含量为 1.32 mg/kg，碱解氮含量为 36.01 mg/kg^[28]，交换性钙含量为 90.13 mg/kg，交换性镁含量为 88.67 mg/kg，有效铜含量为 0.52 mg/kg，有锌含量为 0.99 mg/kg，有效铁含量为 29.46 mg/kg，有效硼含量为 0.25 mg/kg。在 2020 年该试验样地在试验期间无施肥，避免施肥对树体养分的影响。媛华原料林于 2014 年、2015 年、2016 年分别在 1 年生苗木砧上嫁接。选取立地条件较为一致和生长健康的无患子媛华原料林为研究对象，2017 年开始移栽造林，株行距为 4 m×4 m，栽植密度为 600~650 株/hm²，试验林地采用统一的营林管护措施：全年除草 3 次，5、6、7、9 每月除草 1 次；全年杀虫 5 次，4、6、9 月每月喷施杀虫剂 1 次，7 月喷施杀虫剂 2 次。媛华原料林基本特征见表 1。

表 1 无患子无性系原料林基本情况

Tab. 1 Basic situation of *S. chinensis* clone raw material forest sample plot

树龄 Forest age/a	地径 Ground diameter/cm	树高 Tree height/m	平均冠幅 Average crown width/m ²	造林密度 Afforestation density /(plant·hm ⁻²)
5	6.51	2.14	2.3×2.6	630
6	6.97	2.38	2.4×2.2	640
7	7.62	2.86	2.9×2.7	650

1.2 方法

1.2.1 样品处理 2020 年，选取树龄 5、6、7 a

的原料林为试验对象。将无患子生殖生长的关键物候期分为 6 个阶段：展叶期、花序抽生末期、花期末、果实膨大初期、果实转色期和果实成熟期^[29-30]。从样树中进行取样。取样方法在展叶期到果实成熟期各单株树冠四方外围中上部采集健康的结果枝顶端的叶片 20~30 片，105 ℃杀青 30 min，然后在 70 ℃恒温下烘干，粉碎过 1 mm 筛，将干粉干燥保存备用。

1.2.2 指标测定 全氮含量采用凯氏定氮法测定^[31]；全磷含量采用钼锑抗比色法测定^[32]；全钾含量采用火焰光度法测定^[32]；钙、镁、铁、硫、锌元素含量等采用 AAS 法^[33]；硼元素含量采用干灰化-甲亚胺比色法^[33]。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 软件进行统计分析，采用 Origin 2018 软件作图。使用 SPSS 21.0 软件进行单向分组资料的方差分析（Oneway ANOVA）和新复极差法（Duncan’s）多重比较，使用 Pearson 相关性分析一元线性相关性。

2 结果与分析

2.1 不同物候期媛华无患子原料林叶片养分含量动态变化

结果如图 1 所示，自展叶期到果实成熟期，无患子原料林叶片中元素 N 和 P 的含量呈下降-上升-下降趋势。N 和 P 元素含量的最高值均出现在果实膨大初期，最低值均出现在花序抽生末期；P 含量在果实转色期和果实成熟期之间无显著差异，N 含量则有显著差异。进入坐果期，叶片中的 N、P 含量迅速升高；进入果实转色期，N、P 含量迅速下降，尤其是 N 的降幅最大。在整个生长发育过程中，叶片中 K、Ca、Mg 等含量总体呈现升高-降低趋势，K、Ca、Mg 含量的最高值均出现在果实膨大初期；K 含量显著高于其他关键生育期，且在其余生育期（花序抽生期、花期末、果实转色期、果实成熟期）之间无显著差异；Ca 和 Mg 含量在展叶期和果实膨大初期存在显著差异；进入果实发育初期，特别是膨大期，叶片 K、Ca、Mg 等含量急剧升高，而且 K、Ca 含量升幅较大，当果实逐渐成熟时，叶片中 K 含量明显下降；S 含量全年无显著变化。说明无患子在花序抽生期对 N、P 的需求较高；在果实发育期仍需大量 N、P、K、Ca、Mg 元素，S 元素在整个无患子关键生育期的需求不高。

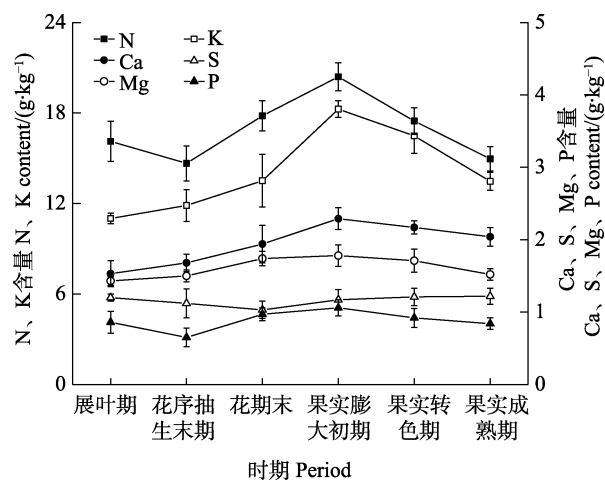


图 1 无患子不同关键物候期叶片中大量元素含量动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of macroelement contents in leaves of *S. chinensis* in different key phenological periods

在无患子叶片微量元素中(图2),自展叶期到果实转色期,无患子原料林叶片中元素Fe含量呈逐渐升高趋势,Fe元素的含量最高值出现在果实转色期,并显著高于其余生育期,且前3个时期无显著差异,从展叶期到花期末,无患子结果枝叶片B含量急剧降低,并在花期末达到最低,且显著低于其他生育期($P<0.05$),相反,Zn元素含量在花期末达到最高,在花序抽生期最低,其在花序抽生期与展叶期、花期末、果实膨大初期存在显著差异($P<0.05$),其他时期无差异。说明无患子在花器官发育期对B和Zn的需求较高;进入果实发育期对Fe的需求较高。

2.2 不同树龄媛华无患子原料林叶片养分元素含量差异

由表2可知,不同树龄原料林叶片大量元素中的N、K元素含量和微量元素中的Zn、B元素含量的均值差异均不显著,但P、Ca、S、Mg、Fe元素含量的均值存在不同程度的显著差异,尤

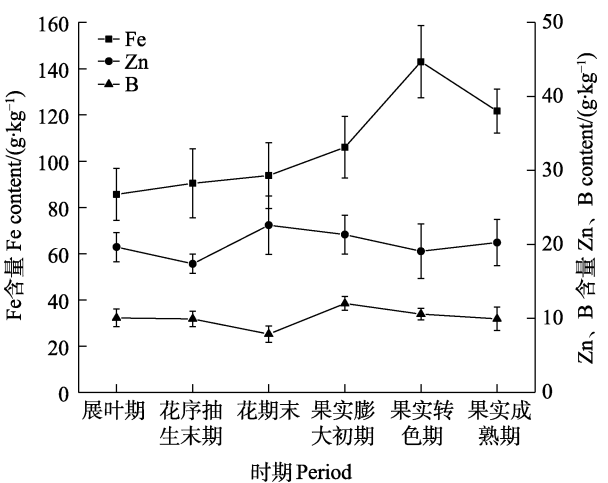


图 2 无患子不同关键物候期叶片中微量元素含量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of trace element contents in leaves of *S. chinensis* in different key phenological periods

其7a树龄原料林叶片P、Mg、Fe含量显著高于5a树龄。

2.3 不同林龄无患子叶片中9种矿质营养元素间相关分析

如表3所示,5、6、7a三个树龄叶片中N含量和P、K、Mg等含量之间均呈显著正相关,Ca含量和K、Fe含量之间均呈显著正相关,S含量和Zn含量之间呈负相关,Zn含量和B含量之间呈负相关,表明大量元素与微量元素含量间也存在较强的相关性。同理,在5a树龄原料林中,叶片N含量与S含量呈显著负相关,而K含量与Zn含量呈负相关,说明各个元素间关系较为密切。因此,无患子人工林植株各营养元素间吸收、转运存在不同程度的协同或拮抗作用。

3 讨论

叶片矿物质营养元素对果树生长、产量和果实品质具有重要的作用。叶片的营养状况可以反

表 2 不同树龄无患子叶片 9 种营养元素含量差异比较
Tab. 2 Comparison of contents of 9 nutrient elements in leaves of *S. mukorossi* affected cotyledons at key phenological stages of different forest ages

树龄 Forest age/a	N	K	P	Ca	Mg	S	Fe	Zn	B
7	16.78±0.08 ^a	14.77±0.18 ^a	0.98±0.02 ^a	2.04±0.03 ^a	1.69±0.02 ^a	1.17±0.04 ^b	121.49±2.29 ^a	21.15±1.02 ^a	10.33±0.36 ^a
6	16.67±0.33 ^a	13.45±1.14 ^a	0.91±0.06 ^a	1.85±0.02 ^c	1.60±0.04 ^a	1.24±0.03 ^a	103.45±0.73 ^b	19.07±1.00 ^a	9.77±0.34 ^a
5	17.26±0.56 ^a	14.08±1.04 ^a	0.77±0.03 ^b	1.93±0.03 ^b	1.55±0.02 ^b	1.06±0.02 ^c	95.32±2.84 ^c	19.93±1.36 ^a	9.72±0.32 ^a

注: 同列数据后不同小写字母表示不同树龄之间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lower case letters after the data in the same column indicate significant difference between different stand ages ($P<0.05$).

表 3 不同树龄无患子叶片中 9 种营养元素间相关性
Tab. 3 Correlation among 9 nutrient elements in leaves of saprophytic cotyledons

树龄 Forest age/a	指标 Index	N	K	P	Ca	Mg	S	Fe	Zn	B
7	N	1	0.627**	0.752**	0.417	0.580*	0.033	0.226	0.233	0.389
	K	0.627**	1	0.662**	0.905**	0.883**	0.046	0.504*	0.504*	0.261
	P	0.752**	0.662**	1	0.654**	0.599**	0.178	0.156	0.472*	0.227
	Ca	0.417	0.905**	0.654**	1	0.805**	0.095	0.486*	0.627**	-0.016
	Mg	0.580*	0.883**	0.599**	0.805**	1	0.045	0.463	0.461	0.190
	S	0.033	0.046	0.178	0.095	0.045	1	0.403	-0.007	0.388
	Fe	0.226	0.504*	0.156	0.486*	0.463	0.403	1	0.068	0.133
	Zn	0.233	0.504*	0.472*	0.627**	0.461	-0.007	0.068	1	-0.385
	B	0.389	0.261	0.227	-0.016	0.190	0.388	0.133	-0.385	1
6	N	1	0.679**	0.739**	0.626**	0.543*	-0.079	0.187	0.266	0.598**
	K	0.679**	1	0.588*	0.668**	0.581*	-0.180	0.402	0.249	0.411
	P	0.739**	0.588*	1	0.502*	0.318	-0.218	0.298	0.480*	0.344
	Ca	0.626**	0.668**	0.502*	1	0.725**	0.040	0.658**	0.125	0.585*
	Mg	0.543*	0.581*	0.318	0.725**	1	-0.049	0.526*	-0.222	0.368
	S	-0.079	-0.180	-0.218	0.040	-0.049	1	0.035	-0.373	0.250
	Fe	0.187	0.402	0.298	0.658**	0.526*	0.035	1	-0.168	0.360
	Zn	0.266	0.249	0.480*	0.125	-0.222	-0.373	-0.168	1	0.207
	B	0.598**	0.411	0.344	0.585*	0.368	0.250	0.360	0.207	1
5	N	1	0.603**	0.668**	0.363	0.599**	-0.498*	-0.027	0.048	0.309
	K	0.603**	1	0.360	0.752**	0.248	-0.092	0.650**	-0.247	0.466
	P	0.668**	0.360	1	0.370	0.560*	-0.011	0.099	0.444	0.171
	Ca	0.363	0.752**	0.370	1	0.025	0.266	0.704**	-0.096	0.237
	Mg	0.599**	0.248	0.560*	0.025	1	-0.461	-0.070	0.477*	-0.109
	S	-0.498*	-0.092	-0.011	0.266	-0.461	1	0.239	0.059	0.067
	Fe	-0.027	0.650**	0.099	0.704**	-0.070	0.239	1	-0.033	0.019
	Zn	0.048	-0.247	0.444	-0.096	0.477*	0.059	-0.033	1	-0.373
	B	0.309	0.466	0.171	0.237	-0.109	0.067	0.019	-0.373	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 ($P<0.01$).

映土壤的供给能力、植株对营养元素的吸收以及需求利用。N 元素是生长发育必需元素，是组成蛋白质的主要成分，被称为生命元素^[34]。本研究表明，无患子叶片 N 含量在整个不同关键期（物候关键期）呈下降-上升-下降趋势。在花器官发育时期，N 含量降低，说明新梢生长，花原基分化，花芽形成会消耗大量的 N 元素。这与曹尚银等^[35]研究果树花芽分化机理时发现花芽分化及雄花序发育过程中需要消耗大量的营养物质的结果基本一致。相关研究表明，果树在发芽分化机理时发现花芽分化及雄花序发育过程中需要消耗大量的营养物质^[36-37]。这与本研究的结果基

本一致。无患子进入坐果期，果实逐渐发育膨大，会消耗大量的 N 元素，导致叶片中 N 含量急剧下降。这与陈在新等^[38]的研究结果相似，因为在果实发育过程，需要叶片通过光合作用产生的物质和能量，由叶片养分物质转运到果实，造成果实光合产物的积累。无患子叶片 P 含量的变化趋势与 N 含量相似，说明无患子在花芽分化期需要消耗大量的 P，也意味着 P 元素对花器官发育起到很重要的作用，P 肥应在花芽分化前施用。在整个生长发育过程中，K 含量总体呈现升高-降低趋势。从展叶期开始，叶面积逐渐增大，叶色渐渐加深，光合作用逐渐增强，需 K 量逐渐增加，随

着关键物候期树体的生长,叶片 K 含量逐渐降低,这是因为 K 素与树体生命活动代谢过程有着密切关系,并为多种酶的活化剂,参与糖和淀粉的合成、运输和转化,致使叶片中的营养物质被消耗^[39-40]。说明在该时期追施 K 肥有助于促进果实膨大。进入果实生长发育末期,树体逐渐进入休眠期,叶片老化、气孔导度降低^[41],导致含量降低,也有研究表明增施 Ca 肥可有效减少果实采后病害,也可延长储存时间^[42-43]。其机理有待于进一步研究。Mg 是叶绿素的成分,又是核糖核酸聚合酶等多种酶的活化剂^[34]。研究表明,媛华无患子叶片中 Mg 含量随着关键物候时期呈现升高-降低。这可能是因为 Mg 移动性较强,随着无患子树体的叶幕逐渐建成,叶片逐渐成熟,Mg 渐渐储存到叶片中,叶片发挥 Mg 的储存库作用,生理分化结束后,Mg 用于形态分化,导致含量降低^[34]。这与郑诚乐等^[44]研究结果相似。Zn 是许多酶所必需的元素,并且在 DNA 转录、维持生物膜完整性、抗逆性等过程中起着重要作用^[45]。叶片中 Zn 元素是可移动元素,Zn 含量在不同的关键物候期波动幅度不大,这与王衍安等^[46]的研究结果一致。从无患子展叶期到果实转色期,叶片中的 Fe 含量升高,表明无患子树体需要充足的 Fe 元素,在果实发育期间,许多生理过程需要叶片通过光合作用产生的物质和能量,其中 Fe 元素直接参与叶片的光合作用过程,叶片保持较高的 Fe 含量,对于提高叶片光合作用进而保证树体生长发育正常进行有重要作用。B 可以参与作物体内碳水化合物的运输和代谢,涉及细胞信号转导和渗透调节等生理过程。在开花授粉期间,无患子人工林叶片 B 含量急剧降低,在花期末有一个低谷,这与 B 元素有促进花芽器官分化的作用有关^[47]。B 元素对无患子的生理作用密切相关,B 元素参与花芽分化,导致叶片中的 B 元素转运到花芽中,造成 B 元素大量消耗,该时期注意追施硼肥。总之,在花器官的发育过程中,N、P、Zn、B 元素在叶片和花之间的吸收、转运及分配较为活跃和频繁;S、Fe、K、Ca、Mg 元素在叶片和花之间的吸收、转运及分配水平较低。在果器官的发育过程中,N、P、K、Fe、Ca、Mg 元素在叶片和果之间的吸收、转运及分配较为活跃和频繁;S、Zn、B 元素在叶片和果之间的吸收、转运及分配水平较低。植物矿质离子间存在复杂的相互作用关系,而且在不同植物或树种间表现不同^[48-50]。

本研究结果表明,无患子叶片中 N 元素含量和 K、P、Mg 元素含量之间均呈显著正相关,这与袁紫倩等^[23]研究结果一致。Ca 含量和 K、Fe 含量之间均呈显著正相关,S 含量和 Zn 含量之间呈负相关,Zn 元含量和 B 含量之间呈负相关,这与陈强等^[15]对蓝莓叶片营养分析的研究结果不一致,其原因可能是不同树种对养分的需求不同而导致营养元素间相互作用的差异。

综上所述,在无患子的生产栽培上,应考虑各元素间的关联,在花序抽生末期,应及早追施氮肥、磷肥和硼肥;在坐果期要适量追肥,同时结合追施微肥。坐果期(6—7 月底)可作为叶片营养诊断的适宜时期;在今后的研究中,应深入研究媛华无患子不同器官矿质养分的吸收利用能力,制定针对媛华无患子叶片营养诊断的标准,采取测土配方施肥方案,为媛华无患子无性系养分管理提供科学依据。

参考文献

- [1] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 47 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Editorial Board of Flora of China. Flora of China: 47 Volumes[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 刘济铭, 孙操稳, 何秋阳, 贾黎明, 翁学煌, 余建平. 国内外无患子属种质资源研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(6): 12-18.
LIU J M, SUN C W, HE Q Y, JIA L M, WENG X H, YU J P. Research progress in *Sapindus* L. germplasm resources[J]. World Forestry Research, 2017, 30(6): 12-18. (in Chinese)
- [3] 孙操稳, 贾黎明, 叶红莲, 高媛, 熊晨妍, 翁雪煌. 无患子果实经济性状地理变异评价及与脂肪酸成分相关性[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 73-83.
SUN C W, JIA L M, YE H L, GAO Y, XIONG C Y, WENG X H. Geographic variation evaluating and correlation with fatty acid composition of economic characters of *Sapindus* spp. fruit[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 73-83. (in Chinese)
- [4] 邵文豪, 岳华峰, 姜景民, 董汝湘, 刁松峰. 不同种源无患子苗期生长性状遗传变异研究[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(1): 21-25.
SHAO W H, YUE H F, JIANG J M, DONG R X, DIAO S F. Study on genetic variation of seedling growth from different provenances of *Sapindus mukorossi*[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2012, 32(1): 21-25. (in Chinese)
- [5] 林文荣. 无患子开发利用前景[J]. 林业勘察设计, 2007(2):

- 118-120.
- LIN W R. The utilized prospect of the *Sapindus mulorossi*[J]. Forestry Prospect and Design, 2007(2): 118-120. (in Chinese)
- [6] AMIRI M E, FALLAHI E, GOLCHIN A. Influence of foliar and ground fertilization on yield, fruit quality, and soil, leaf, and fruit mineral nutrients in apple[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(3): 515-525.
- [7] ULRICH A. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1992, 3(1): 207-228.
- [8] VAHLDE P B, SQUIZANI A W, ETIENNE P L, FRANKDE A E, BRUNETTO G. Nutrient diagnosis of eucalyptus at the factor-specific level using machine learning and compositional methods[J]. Plants, 2020, 9(8): 1049.
- [9] PARENT S É, LAFOND J, PARE M C, PARENT L E, ZIADI N. Conditioning machine learning models to adjust lowbush blueberry crop management to the local agroecosystem[J]. Plants, 2020, 9(10): 1401.
- [10] ZHAO M, LI J. Molecular events involved in fruitlet abscission in litchi[J]. Plants, 2020, 9(2): 151.
- [11] LIMA N A, DEUS J, RODRIGUES V A, NATALE W, PARENT L E. Nutrient diagnosis of fertigated “Prata” and “Cavendish” banana (*Musa* spp.) at Plot-Scale[J]. Plants, 2020, 9(11): 1467.
- [12] 韩振海, 王倩. 我国果树营养研究的现状和展望——文献述评[J]. 园艺学报, 1995(2): 138-146.
- HAN Z H, WANG Q. Current situation and prospects of research on fruit mineral nutrition in China: a literature review[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1995(2): 138-146. (in Chinese)
- [13] 刘茂桥, 潘学军, 张文娥, 李晶晶, 王长雷. 铁核桃叶片主要矿质营养元素含量与生育期动态变化特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 162-170.
- LIU M Q, PAN X J, ZHANG W E, LI J J, WANG C L. Dynamic changes of leaves main mineral elements in *Juglans sigillata* growth period[J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2016, 38(1): 162-170. (in Chinese)
- [14] 刘红霞, 张会民, 郭大勇, 王留好, 王旭刚, 孙丽蓉, 寇太记. 豫西地区红富士苹果叶片营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 457-462.
- LIU H X, ZHANG H M, GUO D Y, WANG L H, WANG X G, SUN L R, KOU T J. Foliar nutrition diagnosis of red *Fuji* apple in western Henan province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(2): 457-462. (in Chinese)
- [15] 陈强, 刘微, 徐小兵, 樊基胜, 张春龙, 肖家欣. 4个蓝莓品种果实发育期叶片矿质营养动态及其相关性[J]. 经济林研究, 2020, 38(1): 184-189.
- CHEN Q, LIU W, XU X B, FAN J S, ZHANG C L, XIAO J X. Dynamics of mineral nutrients in leaves of four *Vaccinium* spp. cultivars during fruit development period and their correlations[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(1): 184-189. (in Chinese)
- [16] 康专苗, 黄海, 李向勇, 何凤平, 刘清国, 张燕, 朱文华, 王代谷, 黄建峰, 党志国, 龚德勇. 贵州红玉杞坐果后果实和叶片矿质元素的动态变化及相关性[J]. 经济林研究, 2021, 39(1): 75-84.
- KANG Z M, HUANG H, LI X Y, HE F P, LIU Q G, ZHANG Y, ZHU W H, WANG D G, HUANG J F, DANG Z G, GONG D Y. Dynamic changes and correlation analysis of mineral elements in fruits and leaves of Guizhou *Hongyumu* after fruit setting[J]. Non-wood Forest Research, 2021, 39(1): 75-84. (in Chinese)
- [17] 王小玲, 刘卓荣, 幸学俊, 高柱. 赣南脐橙生长发育期果实和叶片矿质营养与重金属元素的动态变化及相关性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 77-86.
- WANG X L, LIU Z R, XING X J, GAO Z. Dynamics changes and correlation of mineral nutrition and heavy metal elements in fruits and leaves of navel orange during growth and development in Southern Jiangxi[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 77-86. (in Chinese)
- [18] 张守仕, 乔宝营, 黄海帆, 孙文英, 薛丽丰. “夏黑”葡萄软果果实及叶片矿质元素含量研究[J]. 北方园艺, 2017(20): 77-80.
- ZHANG S S, QIAO B Y, HUANG H F, SUN W Y, XUE L F. Mineral elements concentration of soft fruit and leaf of *summer black grape*[J]. Northern Horticulture, 2017(20): 77-80. (in Chinese)
- [19] 李广会, 郭素娟, 谢鹏. 不同林龄板栗叶片矿质营养的季节变化及差异分析[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(1): 37-43.
- LI G H, GUO S J, XIE P. Seasonal changes of mineral nutrients and difference analysis with *Chestnut* leaves for different-age plantations[J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2014, 31(1): 37-43. (in Chinese)
- [20] REFERENCES A K, PARAMASIVAM S, FARES A, OBREZA T A, SCHUMANM A W. Nitrogen best management practice for citrus trees II. Nitrogen fate, transport, and components of N budget[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 109(3): 223-233.
- [21] PRADUBSUK S, DAVENPORT J R. Seasonal uptake and partitioning of macronutrients in mature ‘concord’ grape[J]. Journal of the American Society For Horticultural Science,

- 2010, 135(5): 474-483.
- [22] MUHAMMAD S, SANDEN B L, LAMPINEN B D, SAA S, SIDDIQUE M I, SMART D R, OLIVOS A, SHACKEL K A, DEJONG T, BROWN P H. Seasonal changes in nutrient content and concentrations in a mature deciduous tree species: study in almond [*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb][J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 65: 52-68.
- [23] 袁紫倩, 杨先裕, 凌骅, 沈辰, 赵伟明, 黄坚钦, 王正加. 薄壳山核桃‘马汉’叶片主要矿质营养元素生育期动态变化特征[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(7): 1443-1449.
- YUAN Z Q, YANG X Y, LING H, SHEN C, ZHAO W M, HUANG J Q, WANG Z J. Dynamic changes of leaves main mineral elements in *Pecan mahan* growth period[J]. *Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica*, 2014, 34(7): 1443-1449. (in Chinese)
- [24] 王帅, 韩晓飞, 王洋, 王正银. 九叶青花椒叶片矿质营养元素主要物候期动态变化特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(7): 1456-1461.
- WANG S, HAN X F, WANG Y, WANG Z Y. Dynamic changes of leaves' mineral elements in *Zanthoxylum armatum* V. *novemfolius* main phenological period[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(7): 1456-1461. (in Chinese)
- [25] 高媛, 贾黎明, 高世轮, 苏淑钗, 段劼, 翁震. 无患子树体合理光环境及高光效调控[J]. *林业科学*, 2016, 52(11): 29-38.
- GAO Y, JIA L M, GAO S L, SU S C, DUAN J, WENG Z. Reasonable canopy light intensity and high light efficiency regulation of *Sapindus mukorossi*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(11): 29-38. (in Chinese)
- [26] 张赧齐, 刘晨, 刘阳, 叶常奇, 张萌, 贾黎明, 郝艳宾, 苏淑钗. 叶幕微域环境对无患子果实产量和品质的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(5): 189-198.
- ZHANG Y Q, LIU C, LIU Y, YE C Q, ZHANG M, JIA L M, HAO Y B, SU S C. Effects of canopy micro-environment on fruit yield and quality characteristics of *Sapindus mukorossi*[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2020, 44(5): 189-198. (in Chinese)
- [27] 何必庭, 何秋阳, 刘济铭, 史双龙, 高世轮, 翁学煌, 贾黎明. 无患子嫩枝扦插生根机理初探及对不同激素处理的响应[J]. *浙江林业科技*, 2019, 39(2): 22-28.
- HE B T, HE Q Y, LIU J M, SHI S L, GAO S L, WENG X H, JIA L M. Effect of different hormones with different concentration on rooting of *Sapindus mukorossi* softwood cuttings[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2019, 39(2): 22-28. (in Chinese)
- [28] 刘俊涛, 仲静, 刘济铭, 罗水晶, 王冕之, 范嘉霖, 贾黎明. 无患子初果期人工林土壤和叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 67-75.
- LIU J T, ZHONG J, LIU J M, LUO S J, WANG M Z, FAN J L, JIA L M. Stoichiometric characteristics of soil and leaves in *Sapindus mukorossi* plantation at an early fruiting stage[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2021, 45(4): 67-75. (in Chinese)
- [29] 高媛, 贾黎明, 苏淑钗, 戴丽莉, 翁震, 郭有枝, 翁学煌. 无患子物候及开花结果特性[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(6): 34-40, 123.
- GAO Y, JIA L M, SU S C, DAI L L, WENG Z, GUO Y Z, WENG X H. Phenology and blossom-fruiting characteristics of *Sapindus mukorossi*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(6): 34-40, 123. (in Chinese)
- [30] ZHAO G, GAO Y, GAO S. The phenological growth stages of *sapindus mukorossi* according to BBCH scale[J]. *Forests*, 2019, 10(6): 462.
- [31] 焦如珍, 董玉红, 孙启武. LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定[S]. 北京: 国家林业局, 2016-01-01. <http://std.samr.gov.cn>.
- JIAO R Z, DONG Y H, SUN Q W. LY/T 1228—2015 Determination of forest soil nitrogen[S]. Beijing: State Forestry Administration, 2016-01-01. <http://std.samr.gov.cn>. (in Chinese)
- [32] 焦如珍, 董玉红, 孙启武. LY/T 1232—2015 森林土壤磷的测定[S]. 北京: 国家林业局, 2016-01-01. <http://std.samr.gov.cn>.
- JIAO R Z, DONG Y H, SUN Q W. LY/T 1232—2015 Determination of phosphorus in forest soil[S]. Beijing: State Forestry Administration, 2016-01-01. <http://std.samr.gov.cn>. (in Chinese)
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [34] 陆景陵. 植物营养学[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- LU J L. Plant Nutrition[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2007. (in Chinese)
- [35] 曹尚银, 张秋明, 吴顺. 果树花芽分化机理研究进展[J]. *果树学报*, 2003(5): 345-350.
- CAO S Y, ZHANG Q M, WU S. Advances in reaserch on the mechanism of flower-bud differentiation of fruit trees[J]. *Journal of Fruit Science*, 2003(5): 345-350. (in Chinese)
- [36] 夏国华, 黄坚钦, 解红恩, 王正加, 汪樟春, 刘力. 山核桃不同器官矿质元素含量的动态变化[J]. *果树学报*, 2014, 31(5): 854-862.
- XIA G H, HUANG J Q, XIE H E, WANG Z J, WANG Z C, LIU L. Dynamic changes of mineral elements in different

- organs of hickory *Carya cathayensis*[J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(5): 854-862. (in Chinese)
- [37] 陈在新, 潘娟, 江道菊. 不同成熟期板栗品种(系)种子发育期主要营养物质与内源激素含量的动态变化[J]. 林业科学, 2011, 47(1): 73-78.
- CHEN Z X, PAN J, JIANG D J. Dynamic changes of main Nutrients and endogenous hormones in seed of different mature period Chinese *Chestnuts* during their seed development[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(1): 73-78. (in Chinese)
- [38] 黄显淦, 王勤, 赵天才. 钾素在我国果树优质增产中的作用[J]. 果树科学, 2000(4): 309-313.
- HUANG X G, WANG Q, ZHAO T C. The role of potassium in the quality and yield increase of fruit trees in China[J]. Journal of Fruit Science, 2000(4): 309-313. (in Chinese)
- [39] 夏宏义, 杨勇, 张永芳, 李亚, 阮小凤. 阳丰甜柿果实营养成分和氨基酸组分分析[J]. 黑龙江农业科学, 2015(1): 116-121.
- XIA H Y, YANG Y, ZHANG Y F, LI Y, RUAN X F. Analysis on nutritive compositions, amino acid content of *Diospyros kaki* cv. youhou Frui[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2015(1): 116-121. (in Chinese)
- [40] 谢玉明, 易干军, 张秋明. 钙在果树生理代谢中的作用[J]. 果树学报, 2003(5): 369-373.
- XIE Y M, YI G J, ZHANG Q M. Effects of calcium in physiology and metabolism of fruit crops[J]. Journal of Fruit Trees, 2003(5): 369-373. (in Chinese)
- [41] VOS J, OYARZUN P J. Photosynthesis and stomatal conductance of potato leaves-effects of leaf age, irradiance, and leaf water potential[J]. Photosynthesis Research, 1987, 11(3): 253-264.
- [42] HIMELRICK D G, MCDUFFIE R F. The calcium cycle: uptake and distribution in apple trees[J]. HortScience, 1983, 18(2): 147-151.
- [43] 王晋, 王玉姣, 王永博, 王亚茹, 李晓, 李勇, 王迎涛. 梨树微量元素营养研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(6): 995-1003.
- WANG J, WANG Y J, WANG Y B, WANG Y R, LI X, LI Y, WANG Y T. Research progress in micronutrients in pears[J]. Journal of Fruit Trees, 2021, 38(6): 995-1003. (in Chinese)
- [44] 郑诚乐, 许伟东, 郭建靖, 陈伟建, 邱伟琴, 吴宪志. 杨梅花芽生理分化期叶片矿质元素含量动态变化[J]. 热带作物学报, 2009, 30(5): 584-588.
- ZHENG C L, XU W D, GUO J J, CHEN W J, QIU W Q, WU X Z. Variation of leaf mineral nutrient content in *Myrica rubra* Sieb. et Zucc during flower-bud physiological differentiation[J]. Chinese Journal of Tropical Crop, 2009, 30(5): 584-588. (in Chinese)
- [45] RUDANI L, VISHAL P, KALAVATI P. The importance of zinc in plant growth-A review[J]. International Research Journal of Natural and Applied Sciences, 2018, 5(2): 38-48.
- [46] 王衍安, 范伟国, 张方爱, 李玲, 孟庆刚, 李建明. 缺锌对苹果树生长和生理指标的影响[J]. 落叶果树, 1999(2): 9-10.
- WANG Y A, FAN W G, ZHANG F A, LI L, MENG Q G, LI J M. Effects of zinc deficiency on growth and physiological indicators of apple trees[J]. Deciduous Fruit, 1999(2): 9-10. (in Chinese)
- [47] 廖光联, 魏清江, 黄春辉, 钟敏, 姜志强, 徐小彪. 果树硼营养元素研究进展[J]. 农学学报, 2019, 9(12): 28-32.
- LIAO G L, WEI Q J, HUANG C H, ZHONG M, JIANG Z Q, XU X B. Boron nutrition in fruit trees: research progress[J]. Journal of Agronomy, 2019, 9(12): 28-32. (in Chinese)
- [48] 曹永庆, 任华东, 王开良, 徐文才, 周庆, 姚小华. 不同品种油茶叶片矿质元素含量特征及差异分析[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(3): 374-380.
- CAO Y Q, REN H D, WANG K L, XU W C, ZHOU Q, YAO X H. Analysis on the characteristics and difference of mineral elements content in leaves from different varieties of *Camellia oleifera* Abel[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(3): 374-380. (in Chinese)
- [49] BAXTER I, HERMANS C, LAHNER B, YAKUBOVA E, TIKHONOVA M, VERBRUGGEN N. Biodiversity of mineral nutrient and trace element accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. PLoS One, 2012, 7(4): e35121.
- [50] QUAZI F Q, TOSHIHIRO W, CHEN Z. Ionomic response of *Lotus japonicus* to different root-zone temperatures[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(2): 221-232.