

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230158

核桃叶片生理性焦枯与矿质元素关系研究

王霞磊¹, 梁鑫森¹, 刘佳乐¹, 贾鹏¹, 陈利英^{2,3,4}, 齐国辉^{1,2,4*}

(1. 河北农业大学林学院, 河北保定 071000; 2. 河北省核桃技术创新中心, 河北临城 054300; 3. 河北绿岭果业有限公司, 河北临城 054300; 4. 河北省(邢台)核桃产业技术研究院, 河北临城 054300)

摘要: [目的] 以叶片营养诊断为主的方法对核桃叶片的矿质元素等指标进行测定和分析, 找出核桃叶片焦枯发生的原因, 为核桃生产栽培管理提供理论依据。[方法] 按叶片焦枯程度对核桃树进行分级, 测定不同焦枯程度、不同时期核桃叶片中 N、P、K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、B 元素含量、叶绿素含量, 并进行叶片矿质元素间、矿质元素与焦枯程度之间的相关性分析和多元 Logistic 回归分析。[结果] 不同焦枯程度的叶片光合色素的含量随着焦枯程度及时间的推移大体呈下降的趋势, 焦枯现象会从叶缘向叶片中部发展。病情程度与 N 含量呈显著正相关, 相关系数为 0.63, 与 P 含量呈极显著正相关, 相关系数为 0.76, 与 Mn、B 含量呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.73、-0.91。B 含量与病情程度的 Logistic 回归系数值为 -0.872, 且呈现出 0.05 水平的显著性 ($p < 0.05$), 对焦枯程度有显著的负向影响关系。且喷施不同浓度的 B 肥后焦枯症状得到了有效缓解。[结论] 测定分析了‘绿岭’核桃焦枯叶片 11 种矿质元素含量的关系, 发现缺 B 是引起‘绿岭’核桃叶片焦枯的最主要原因。

关键词: 核桃叶片; 矿质元素; 生理性焦枯

中图分类号: S432.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)01-0140-10

核桃 (*Juglans regia* L.) 是胡桃科核桃属落叶乔木, 是“木本油料之王”, 综合开发利用价值极高^[1]。我国核桃产量大于消费量, 部分产品主要用于出口, 中国核桃出口量及出口金额呈现上涨态势, 2023 年 1—3 月中国核桃出口量为 6.33 万吨, 出口金额为 1.63 亿美元^[2]。生长发育条件不适宜时会导致生理性病害的发生, 使核桃体内的矿质元素失衡。叶片出现脉间失绿、边缘焦枯等症状, 造成核桃的产量和品质下降^[3-4]。李源等^[5]指出核桃叶片焦枯症会造成 20.0%~30.0% 的核桃园发生不同程度的生理病害, 叶缘变褐、焦枯, 果实变黑、萎缩, 发病核桃树商品率仅为 60.0%~80.0%。张计峰等^[6]指出南疆地区核桃园发生不同程度的生理病害, 叶片出现叶缘焦枯的症状, 使品质严重下降、商品率较低, 造成的经济损失高达 1 000~3 000 元·(667 m²)⁻¹。郭全恩等^[7]发

现, 秦安县郑川乡一带大面积苹果树出现叶缘焦枯, 甚至死亡现象。果园受害面积迅速扩大, 受害程度不断加重, 对苹果树生产造成了严重影响。

矿质元素是植物生长发育、生理代谢与果实品质形成的物质基础和重要调控因子, 对树体的正常生长发育有着不可代替的作用^[8-9], 失衡会影响树体发生相应的生理变化, 使叶片发生焦枯^[10]。但关于核桃叶片生理性焦枯与矿质元素之间的关系还不明确。本研究以叶片营养诊断的方法对核桃叶片的矿质元素进行测定, 找出核桃叶片焦枯发生的原因, 为核桃生产栽培管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 6 月在河北省临城县河北绿岭

收稿日期: 2023-04-21 修回日期: 2023-06-11

基金项目: 河北省重点研发计划项目“核桃现代种业科技创新”(21326304D-2)。

* 通讯作者: 齐国辉, 博士, 教授, 研究方向: 主要从事经济林栽培生理研究。E-mail: bdqgh@sina.com

果业有限公司示范园核桃基地进行。该基地位于临城县城北 6 km 处, $114^{\circ}31'38.13''$ E, $37^{\circ}31'49.79''$ N, 海拔 96 m。年均日照 2 653 h, 年均气温 13.0°C , 年均降水量 521 mm。

1.2 试验材料

以叶片不同焦枯程度的‘绿岭’核桃树为试材, 按焦枯程度占整片叶的百分比对核桃树进行分级 (图 1, CK: 0.0%, $0.0\% < \text{I 级} \leq 25.0\%$, $25.0\% < \text{II 级} \leq 50.0\%$, $50.0\% < \text{III 级} \leq 75.0\%$, $75.0\% < \text{IV 级} \leq 100.0\%$), 共设 5 个级别。随机排列。每个级别 2 株为 1 小区, 3 次重复, 共 30 株试验树。于 2021 年 6 月 20 日、7 月 21 日、8 月 20 日采样, 每株从东、西、南、北 4 个方向分别取叶 2 片, 部位为结果枝上复叶的顶叶, 每小区各处理分别采集 16 枚叶片。



图 1 ‘绿岭’核桃叶片不同焦枯程度的表现形态
Fig. 1 Apparent morphology of ‘Lyuling’ walnut leaves with different scorching levels

1.3 试验方法

1.3.1 叶绿素含量的测定^[11] 用 6 mm 孔径的手

握式打孔机在叶片中部 (距主叶脉 3~5 mm) 和叶缘部分 (距叶片边缘 1~2 mm) 取新鲜植物叶片 0.1 g, 利用乙醇提取法进行测定。

1.3.2 元素的测定^[12] 全 N: 凯氏定氮法; 全 P: 钼锑钒比色法; 全 K、Na、Ca、Mg: 稀释一定的浓度后, 用原子吸收分光光度计直接测定; Fe、Mn、Cu、Zn: 原子吸收分光光度计直接测定; B: 姜黄素比色法。

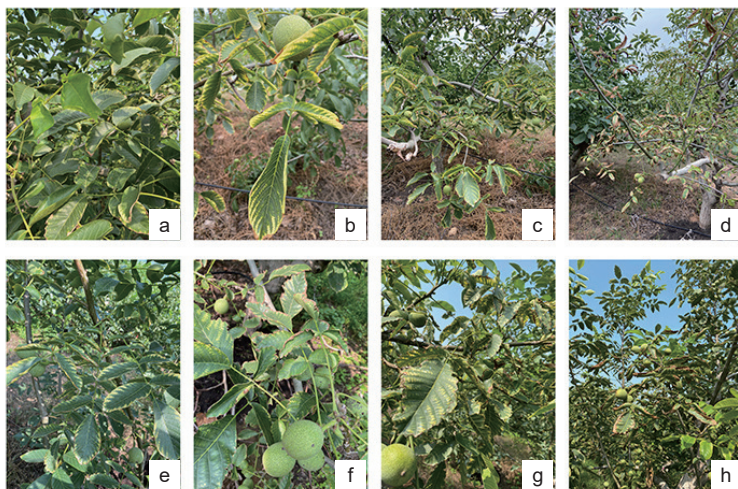
1.4 数据处理

数据处理采用 Microsoft Excel, 用 SPSS22.0 统计软件对数据进行分析: 组间差异显著性采用单因素方差分析, 用 Duncan 法对各组数据平均值进行多重比较; Pearson 相关性分析和多元有序 Logistic 回归分析。采用 GraphPad Prism、origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同焦枯程度核桃树的生长形态

通过对‘绿岭’核桃树生长形态进行观察并拍照, 核桃叶片形态出现不同程度的焦枯 (图 2)。病树的新生叶片均发现有焦枯现象。病叶表现为叶片边缘发黄连成波纹型向主叶脉方向延伸, 直至整个叶片发黄焦枯, 叶片的正背面无霉状物、菌脓等病征, 为非侵染性病害 (图 2a~f)。随着时间和焦枯程度的增加, 叶片边缘逐渐由黄变褐, 最后枯萎脱落 (图 2f、h)。随时间增加, 各级病叶占全树比例未发现有明显变化。



注: a~d: 6 月份不同焦枯程度的树体形态; e~h: 8 月份不同焦枯程度的树体形态

Notes: a~d: Tree morphology with different scorching levels in June; e~h: Tree morphology with different scorching levels in August

图 2 ‘绿岭’核桃不同焦枯程度的树体形态

Fig. 2 Tree morphology of ‘Lyuling’ walnut trees with different scorching levels

2.2 不同焦枯程度核桃叶片光合色素含量的变化

在叶片中部(表1),随着焦枯程度的增加,各月份叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量大体呈下降的趋势。6、7月份IV级的类胡萝卜素含量,8月份IV级的叶绿素a、叶绿素b含量下降最为显著,与对照相比,分别降低了26.7%、24.4%、24.4%、31.9%。6、7月份叶绿素a、叶绿素b含量,8月份类胡萝卜素含量无显著性差异。随着时间的推移,各级别叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量呈现下降的趋势。8月O、I、IV级叶绿素a含量,I级叶绿素b含量与6月份相比分别降低了23.9%、31.7%、33.0%、31.4%。6月到7月份,各级别光合色素含量无显著性差异。

表1 不同焦枯程度的‘绿岭’核桃叶片中部叶绿素含量

Table 1 Chlorophyll contents in the middle of ‘Lyuling’ walnut leaves with different scorching levels

色素种类 Pigment types	病级 Disease level	日期 Date		
		6月	7月	8月
叶绿素a Chla/ (mg·g ⁻¹)	O	2.05 ± 0.36 aA	1.78 ± 0.04 aAB	1.56 ± 0.15 aB
	I	2.05 ± 0.15 aA	1.95 ± 0.21 aA	1.40 ± 0.18 abB
	II	1.83 ± 0.34 aA	1.77 ± 0.04 aA	1.46 ± 0.04 aA
	III	1.82 ± 0.48 aA	1.80 ± 0.47 aA	1.40 ± 0.17 abA
	IV	1.76 ± 0.20 aA	1.62 ± 0.24 aA	1.18 ± 0.03 bB
叶绿素b Chlb/ (mg·g ⁻¹)	O	0.84 ± 0.12 aA	0.81 ± 0.02 aA	0.69 ± 0.06 aA
	I	0.86 ± 0.12 aA	0.79 ± 0.06 aA	0.59 ± 0.05 abB
	II	0.73 ± 0.15 aA	0.72 ± 0.06 aA	0.56 ± 0.06 abA
	III	0.72 ± 0.18 aA	0.71 ± 0.17 aA	0.57 ± 0.12 abA
	IV	0.63 ± 0.13 aA	0.61 ± 0.16 aA	0.47 ± 0.02 bA
类胡萝卜素 Car/ (mg·g ⁻¹)	O	0.45 ± 0.06 aA	0.41 ± 0.05 aA	0.39 ± 0.02 aA
	I	0.41 ± 0.02 abA	0.36 ± 0.02 abA	0.36 ± 0.03 aA
	II	0.38 ± 0.05 abA	0.32 ± 0.05 bA	0.30 ± 0.06 aA
	III	0.39 ± 0.06 abA	0.35 ± 0.04 abA	0.31 ± 0.09 aA
	IV	0.33 ± 0.06 bA	0.31 ± 0.03 bA	0.29 ± 0.02 aA

注: 同列不同小写字母表示不同焦枯程度之间在0.05水平上差异显著, 同行不同大写字母表示不同月份之间在0.05水平上差异显著。下同

Notes: Different small letters in the same column indicate significant differences between different scorching levels at the 0.05 level, different capital letters in the same industry indicate significant differences between different months at the 0.05 level. The same below

在叶缘部分(表2),随着焦枯程度和时间的增加,叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量呈下降的趋势。各月份III、IV级叶绿素b、类胡萝卜素

含量与对照相比均有显著性差异。6月份IV级叶绿素a含量,8月份IV级叶绿素b、类胡萝卜素含量与对照相比下降最为明显,分别降低了60.0%、76.8%、79.5%。各月份O、I级的叶绿素a含量无明显差异。6月到7月份,各级别光合色素含量无显著性差异。8月份I级的叶绿素a,II级叶绿素b含量,IV级类胡萝卜素含量与6月份相比下降最为明显,分别降低了44.4%、63.1%、75.0%。

表2 不同焦枯程度的‘绿岭’核桃叶缘部叶绿素含量
Table 2 Chlorophyll contents in the leaf margin of ‘Lyuling’ walnut with different scorching levels

色素种类 Pigment types	病级 Disease level	日期 Date		
		6月	7月	8月
叶绿素a Chla/ (mg·g ⁻¹)	O	2.05 ± 0.36 aA	1.78 ± 0.04 aAB	1.56 ± 0.15 aB
	I	1.78 ± 0.17 aA	1.61 ± 0.24 aA	0.99 ± 0.12 aB
	II	1.29 ± 0.16 bA	1.28 ± 0.18 abA	0.83 ± 0.08 bcB
	III	1.17 ± 0.29 bcA	1.12 ± 0.23 abA	0.70 ± 0.17 cB
	IV	0.82 ± 0.01 cA	0.79 ± 0.226 bA	0.73 ± 0.12 cA
叶绿素b Chlb/ (mg·g ⁻¹)	O	0.84 ± 0.12 aA	0.81 ± 0.02 aA	0.69 ± 0.06 aA
	I	0.72 ± 0.08 abA	0.68 ± 0.08 abA	0.34 ± 0.06 bB
	II	0.65 ± 0.29 abA	0.61 ± 0.10 abA	0.24 ± 0.02 bB
	III	0.56 ± 0.07 bA	0.46 ± 0.13 bA	0.22 ± 0.04 bB
	IV	0.34 ± 0.05 cA	0.25 ± 0.05 cA	0.16 ± 0.06 bA
类胡萝卜素 Car/ (mg·g ⁻¹)	O	0.45 ± 0.06 aA	0.41 ± 0.05 aA	0.39 ± 0.02 aA
	I	0.36 ± 0.03 bA	0.35 ± 0.08 bA	0.21 ± 0.04 bB
	II	0.32 ± 0.08 bA	0.26 ± 0.01 cA	0.19 ± 0.05 bA
	III	0.27 ± 0.05 cA	0.25 ± 0.03 cA	0.18 ± 0.02 bA
	IV	0.32 ± 0.06 bA	0.21 ± 0.04 cA	0.08 ± 0.01 cB

2.3 不同焦枯程度核桃叶片大量元素含量变化

不同焦枯程度核桃叶片大量元素含量变化如图3所示,随焦枯程度的增加,叶片N、P含量大致呈上升的趋势,K、Na、Ca含量变化情况比较复杂,Mg含量变化相对稳定。6月份II、III级,7月份I、IV级N含量显著高于对照,最高高出26.1%;8月份各级别与对照无显著差异。6月、8月份II、III、IV级以及7月份II、III级P含量显著高于对照,7月份IV级与对照有差异但不显著。6月份II、III级,7月份II、III、IV级K含量显著高于对照,8月份各级别与对照无显著差异。6、8月份I级Na含量最高,分别为0.33 g·kg⁻¹、0.22 g·kg⁻¹,7月份对照Na含量最高,为0.26

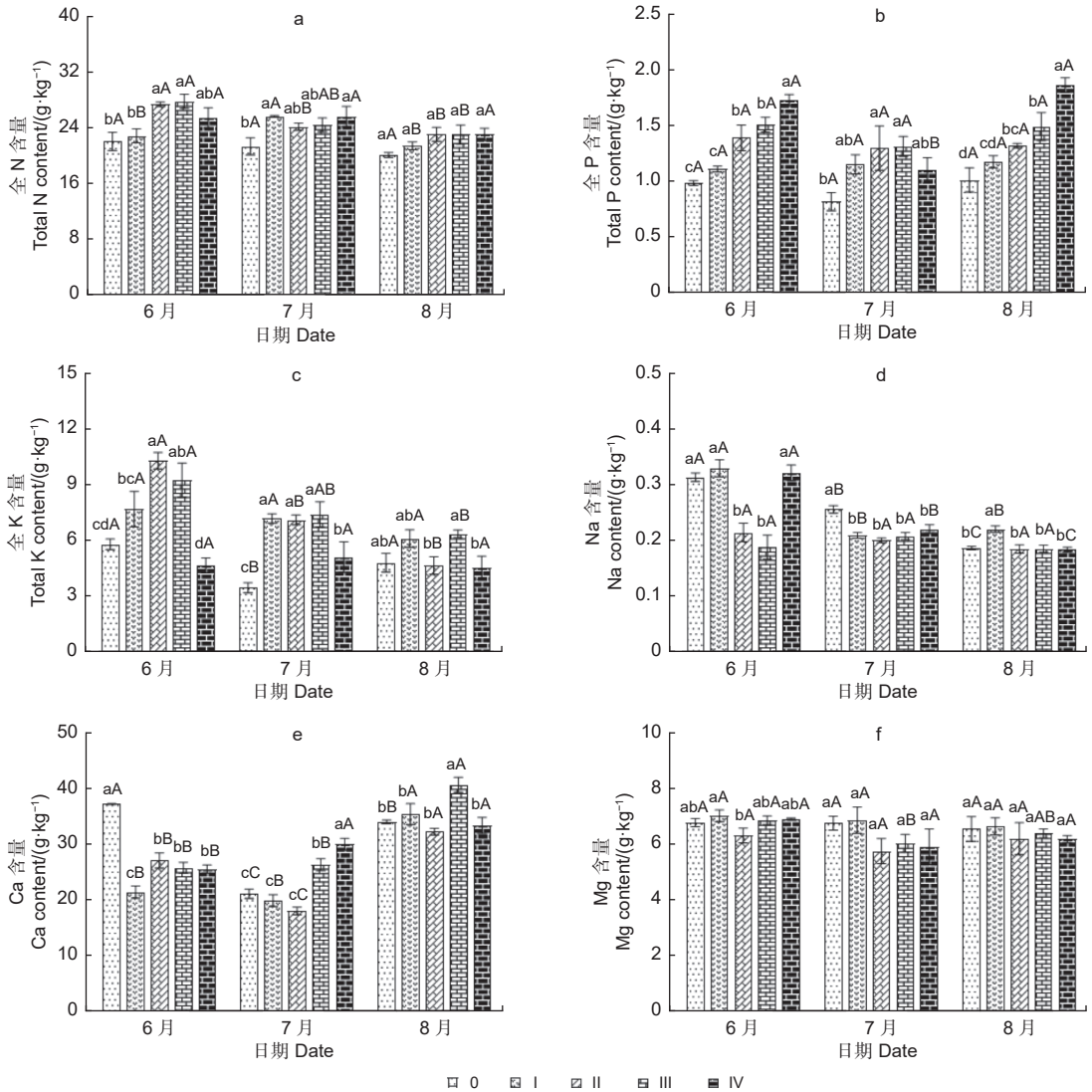


图 3 ‘绿岭’核桃叶片不同焦枯程度下大量元素含量

Fig. 3 Contents of major elements in leaves of ‘Lyuling’ walnut at different scorching levels

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。6月份对照 Ca 含量最高, 7月份IV级 Ca 含量最高, 8月份III级 Ca 含量最高。Mg 含量各级别与对照均无显著差异。

随着时间的推移, N、K、Na 含量大致呈逐渐下降的趋势, P、Ca、Mg 含量大致呈先下降后升高的趋势。8月份II、III级 N 含量显著低于6月份。7月份IV级 P 含量显著低于6、8月份, 8月份各级别 P 含量与6月份无显著差异。7、8月份II、III级 K 含量显著低于6月份。7、8月份对照、I、IV级 Na 含量显著低于6月份。8月III级叶片 Ca 含量最高, 为 $40.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 7月II级叶片 Ca 含量最低, 为 $18.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.4 不同焦枯程度核桃叶片微量元素含量变化

不同焦枯程度核桃叶片微量元素含量变化如

图 4 所示, 随焦枯程度的增加, 叶片 Fe、Cu、Zn 含量变化情况比较复杂, Mn、B 含量大致呈下降的趋势。6月份对照 Fe 含量显著高于I、II级, 7月份对照与各级别 Fe 含量无显著差异, 而8月份对照 Fe 含量显著低于I、III、IV级。6月份 Mn 含量各级别与对照无显著差异, 7、8月份对照 Mn 含量与各级别差异显著, 分别为 $185.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $180.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。6月份对照 Cu 含量最低, Zn 含量最高, 分为 $30.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $38.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 8月份对照 Cu 含量最高, 为 $68.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; III级 Zn 含量最低, 为 $16.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除6月份I级与对照 B 含量无显著差异外, 各月份对照与各级别 B 含量均有显著差异, 最大降低了 57.1%。

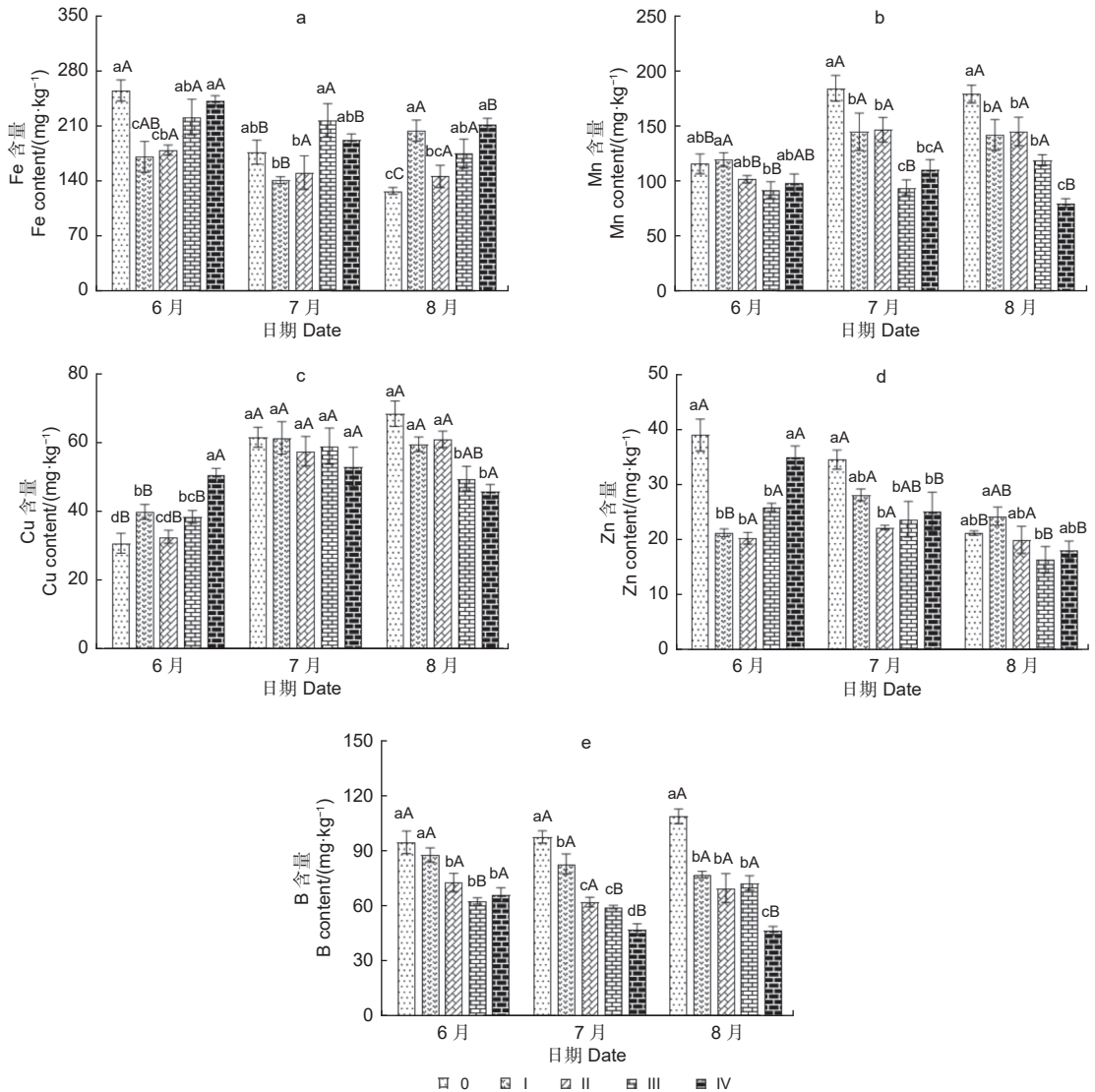


图 4 ‘绿岭’核桃叶片不同焦枯程度下微量元素含量

Fig. 4 Contents of trace elements in leaves of ‘Lyuling’ walnut at different scorching levels

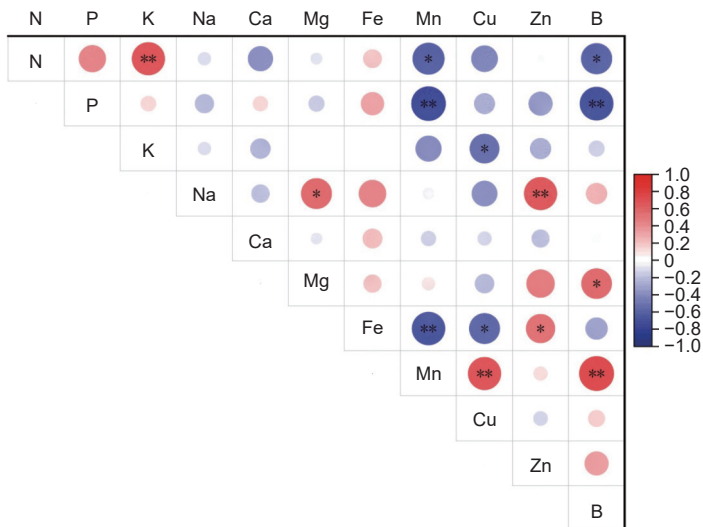
随着时间的推移，叶片对照、II、III级 Fe 含量大致呈逐渐下降的趋势，I、IV级 Fe 含量大致呈先下降后上升的趋势，Mn 含量大致呈先上升后下降的趋势，B 含量变化相对稳定。7、8 月份对照、IV级 Fe 含量显著低于 6 月份。7、8 月份对照、II级 Mn 含量，对照、I、II级 Cu 含量显著高于 6 月份。8 月份对照、III、IV级 Zn 含量显著低于 6 月份。8 月份 III级 B 含量显著高于 6 月份，IV级 B 含量最低，为 46.79 mg·kg⁻¹，且显著低于 6 月份。

2.5 不同焦枯叶片的矿质元素间、病情程度与矿质元素的相关性

不同焦枯叶片矿质元素间的相关性见图 5，叶片 N 与 K 含量呈极显著正相关，相关系数为

0.66；与 Mn、B 含量呈显著负相关，相关系数分别为 -0.62、-0.58。叶片 P 与 Mn、B 含量呈极显著负相关，相关系数分别为 -0.72、-0.69。叶片 K 与 Cu 含量呈显著负相关，相关系数为 -0.53。叶片 Na 与 Mg 含量呈显著正相关，相关系数为 0.57；与 Zn 含量呈极显著正相关，相关系数为 0.66。叶片 Mg 与 B 含量呈显著正相关，相关系数为 0.59。叶片 Fe 与 Zn 含量呈显著正相关，相关系数为 0.52；与 Cu 含量呈显著负相关，相关系数为 -0.58；与 Mn 含量呈极显著负相关，相关系数为 -0.67。叶片 Mn 与 Cu、B 含量呈极显著正相关，相关系数分别为 0.66、0.71。

将病情程度进行赋值（O：0、I：1、II：2、III：3、IV：4）后，与矿质元素进行相关性分



注: *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著

Note: *and**indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels respectively

图 5 不同焦枯叶片矿质元素间相关性

Fig. 5 Correlation between mineral elements in different scorched leaves

表 3 病情程度与矿质元素的相关性

Table 3 Correlation between disease severity and mineral element contents

	相关系数 Correlation coefficient										
	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	B
病情程度 Degree of illness	0.63*	0.76**	0.01	-0.26	0.01	-0.36	0.39	-0.73**	-0.32	-0.23	-0.91**

析, 结果见表 3, 病情程度与 N 含量呈显著正相关, 相关系数为 0.63, 与 P 含量呈极显著正相关, 相关系数为 0.76, 与 Mn、B 含量呈极显著负相关, 相关系数分别为-0.73、-0.91。

2.6 基于多元有序 Logistic 回归模型的病情程度影响因素分析

将测定的 11 个连续变量与病情程度(分类变量)进行多元有序 Logistic 回归处理, 并满足平行线检验后, 得到的回归结果见表 4。综合以上分析, K、Ca 含量虽然呈现出 0.05 水平的显著性(0.034、0.043<0.050), 但与病情程度的相关性不显著, 故不做考虑。B 含量回归系数值为-0.872, 且呈现出 0.05 水平的显著性(0.028<0.050), 说明 B 元素含量对焦枯程度有显著的负向影响关系。

2.7 喷硼对核桃叶片的影响

为进一步验证缺 B 导致的叶片焦枯, 选择发生焦枯的‘绿岭’核桃进行叶面喷硼肥试验, 于 2022 年 6、7 和 8 月份喷施 0.0% (对照)、0.2% 和 0.4% 的硼砂, 成熟期采集叶片测定相关生理指标。

表 4 多元有序 Logistic 回归模型分析结果

Table 4 Analysis results of multivariate ordered Logistic regression model

变量 Variable	回归系数 Regression coefficient	标准误 Standard error	Wald	p 值 P value
N	1.418	0.808	3.078	0.079
P	9.904	6.065	2.666	0.103
K	-3.057	1.438	4.516	0.034
Na	56.338	33.257	2.870	0.090
Ca	0.552	0.272	4.111	0.043
Mg	-3.858	2.165	3.175	0.075
Fe	0.012	0.030	0.172	0.679
Mn	-0.200	0.102	3.845	0.050
Cu	-0.226	0.142	2.530	0.112
Zn	0.037	0.291	0.017	0.898
B	-0.872	0.396	4.849	0.028

2.7.1 喷硼后核桃叶片的光合色素含量 喷硼后叶片的光合色素含量如表 5 所示, 总体上, 喷施不同浓度的 B 肥可以提高叶片的光合色素含量, 随着喷 B 浓度的增加, 叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝

卜素含量呈上升的趋势。喷 B 浓度为 0 时, I 级叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均显著高于 III、IV 级。当喷 B 浓度为 0.2% 和 0.4% 时, 各级别叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均无显著性差异, 且均高于喷 B 浓度为 0 时的光合色素含量。

表 5 喷硼后核桃叶片的光合色素含量

Table 5 Photosynthetic pigments content in walnut leaves after boron spraying

色素种类 Pigment types	病级 Disease level	处理 Treatments		
		B: 0.0%	B: 0.2%	B: 0.4%
叶绿素a Chla/ (mg·g ⁻¹)	I	1.40 ± 0.10 aA	1.70 ± 0.44 aA	2.32 ± 0.10 aA
	II	1.17 ± 0.07 abB	2.02 ± 0.13 aA	2.11 ± 0.10 aA
	III	0.99 ± 0.14 bB	2.11 ± 0.21 aA	2.50 ± 0.06 aA
	IV	1.03 ± 0.10 bB	2.18 ± 0.09 aA	2.53 ± 0.26 aA
叶绿素b Chlb/ (mg·g ⁻¹)	I	0.45 ± 0.05 aB	0.70 ± 0.17 aAB	0.95 ± 0.05 aA
	II	0.31 ± 0.01 bB	0.83 ± 0.02 aA	0.83 ± 0.06 aA
	III	0.29 ± 0.01 bcC	0.83 ± 0.09 aB	1.01 ± 0.04 aA
	IV	0.21 ± 0.01 cB	0.89 ± 0.02 aA	1.01 ± 0.29 aA
类胡萝卜素 Car/ (mg·g ⁻¹)	I	0.32 ± 0.03 aA	0.30 ± 0.08 aA	0.42 ± 0.03 aA
	II	0.24 ± 0.02 aB	0.38 ± 0.02 aA	0.42 ± 0.01 aA
	III	0.22 ± 0.01 bB	0.38 ± 0.02 aA	0.45 ± 0.01 aA
	IV	0.19 ± 0.02 cB	0.40 ± 0.01 aA	0.41 ± 0.04 aA

2.7.2 喷硼后核桃叶片的大量元素含量 喷硼后叶片的大量元素含量如表 6 所示, 喷施 B 肥各元素含量的变化情况比较复杂, 大致降低了叶片 N、P、K 元素含量。随着喷 B 浓度的增加, I 级 P、Ca 元素、II 级 K、Na 元素和 III、IV 级 Mg 元素含量呈现先上升后下降的趋势, 而 III 级 N、P 元素含量、IV 级 N、Na 元素含量、I 级 Mg 元素含量呈现先下降后上升的趋势。喷 B 浓度为 0.0% 时, 各级别 N、Mg 元素含量均无显著性差异。喷 B 浓度为 0.4% 时, 各级别 P、K、Ca 元素含量均无显著性差异。

2.7.3 喷硼后核桃叶片的微量元素含量 喷硼后叶片的微量元素含量如表 7 所示, 喷施 B 肥后, 叶片 Mn、Zn、B 元素含量呈现出增加的趋势。喷 B 浓度为 0.2% 时, 各级别 Mn、Cu 元素含量均无显著性差异, 各级别 B 元素含量分别比喷 B 浓度为 0.0% 时高出 52.1%、36.5%、45.7%、140.8%。喷 B 浓度为 0.4% 时, 各级别 B 元素含量分别比

表 6 喷硼后核桃叶片的大量元素含量

Table 6 Large element content in walnut leaves after boron spraying

元素种类 Element types	病级 Disease level	处理 Treatments		
		B: 0.0%	B: 0.2%	B: 0.4%
N/ (g·kg ⁻¹)	I	31.24 ± 0.82 aA	27.62 ± 1.33 aB	22.66 ± 0.27 bC
	II	33.59 ± 1.43 aA	23.45 ± 1.88 aB	23.56 ± 0.52 bB
	III	33.54 ± 2.02 aA	23.37 ± 1.23 aB	28.60 ± 1.44 aAB
	IV	33.62 ± 1.27 aA	25.87 ± 0.40 aB	28.11 ± 1.04 aB
P/ (g·kg ⁻¹)	I	1.50 ± 0.04 cB	1.96 ± 0.04 aA	1.67 ± 0.11 aB
	II	1.72 ± 0.03 bcA	1.56 ± 0.09 bcAB	1.17 ± 0.19 aB
	III	1.95 ± 1.16 bA	1.41 ± 0.14 cB	1.74 ± 0.18 aAB
	IV	2.44 ± 0.09 aA	1.83 ± 0.14 abB	1.60 ± 0.20 aB
K/ (g·kg ⁻¹)	I	9.29 ± 0.71 abA	7.26 ± 0.36 abB	6.62 ± 0.42 aB
	II	7.06 ± 0.72 cA	8.32 ± 0.86 aA	6.78 ± 0.73 aA
	III	9.66 ± 0.32 aA	6.39 ± 0.42 bB	6.22 ± 0.61 aB
	IV	7.55 ± 0.45 bcA	7.48 ± 0.41 abA	5.83 ± 0.26 aB
Na/ (g·kg ⁻¹)	I	0.24 ± 0.01 aB	0.13 ± 0.01 bC	0.30 ± 0.01 aA
	II	0.20 ± 0.01 bB	0.30 ± 0.01 aA	0.21 ± 0.01 cB
	III	0.20 ± 0.01 bC	0.32 ± 0.01 aA	0.25 ± 0.01 bB
	IV	0.20 ± 0.01 bB	0.14 ± 0.01 bC	0.29 ± 0.01 aA
Ca/ (g·kg ⁻¹)	I	32.91 ± 1.06 bB	38.11 ± 0.67 aA	30.60 ± 1.18 aB
	II	31.19 ± 0.57 bA	30.45 ± 0.74 bAB	27.91 ± 1.23 aB
	III	37.33 ± 0.44 aA	36.86 ± 0.55 aA	27.62 ± 0.61 aB
	IV	32.95 ± 0.84 bA	29.66 ± 1.85 bA	28.98 ± 1.18 aA
Mg/ (g·kg ⁻¹)	I	5.97 ± 0.28 aA	5.34 ± 0.05 cB	6.17 ± 0.02 bA
	II	5.58 ± 0.52 aA	6.32 ± 0.09 bA	6.59 ± 0.09 aA
	III	5.75 ± 0.14 aB	6.79 ± 0.12 aA	5.21 ± 0.09 cC
	IV	5.57 ± 0.11 aC	6.63 ± 0.21 abA	6.08 ± 0.07 bB

喷 B 浓度为 0.0% 时高出 70.9%、55.7%、50.5%、108.3%。

3 讨论

除了 N、P、K 等大量元素外, 微量元素也是植物正常生长、发育、开花和结果所必需的^[13]。Fe、Mn、Cu、Zn 和 B 等元素参与了植物所有的新陈代谢和细胞功能。对植物生长(光合作用、色素和蛋白质、酶活性、合成和细胞分裂)起到至关重要的作用^[14]。本试验研究了核桃叶片生理性焦枯与矿质元素的关系, 具有重要的现实意义, 但因品种与栽培区的不同, 叶片发生焦枯的因素有很多, 且各种元素又常常相互影响^[15], 情况比较复杂。本

表 7 喷硼后核桃叶片的微量元素含量

Table 7 Trace element content in walnut leaves after boron spraying

元素种类 Element types	病级 Disease level	处理 Treatments		
		B: 0.0%	B: 0.2%	B: 0.4%
Fe/ (mg·kg ⁻¹)	I	218.30 ± 14.26 aA	248.52 ± 4.62 aA	185.33 ± 3.07 cB
	II	155.93 ± 15.12 bB	239.98 ± 9.07 aA	234.65 ± 7.34 bA
	III	186.83 ± 20.01 abB	250.53 ± 6.35 aA	192.63 ± 2.34 cB
	IV	226.60 ± 8.51 aB	207.47 ± 1.27 bC	258.59 ± 3.36 aA
Mn/ (mg·kg ⁻¹)	I	71.68 ± 2.99 aB	82.37 ± 0.72 aB	112.65 ± 5.66 aA
	II	76.57 ± 2.17 aB	85.65 ± 1.73 aA	93.08 ± 3.19 bcA
	III	59.18 ± 2.21 bB	82.50 ± 5.51 aA	79.94 ± 1.97 cA
	IV	55.95 ± 1.78 bC	86.70 ± 5.13 aB	104.83 ± 5.69 abA
Cu/ (mg·kg ⁻¹)	I	38.55 ± 1.01 aA	34.15 ± 1.45 aB	37.02 ± 1.43 aA
	II	37.92 ± 1.54 aA	32.22 ± 1.58 aB	31.31 ± 1.93 bB
	III	33.76 ± 1.68 abA	31.46 ± 1.16 aA	32.75 ± 1.26 bA
	IV	29.94 ± 2.74 bA	31.54 ± 1.44 aA	30.36 ± 1.31 bA
Zn/ (mg·kg ⁻¹)	I	28.66 ± 1.95 aC	38.50 ± 0.64 aA	33.70 ± 0.69 aB
	II	21.27 ± 0.62 bC	31.93 ± 0.36 bA	27.24 ± 1.96 bcB
	III	20.99 ± 1.19 bB	33.07 ± 0.96 bA	30.22 ± 0.70 abA
	IV	21.45 ± 1.86 bB	33.04 ± 1.27 bA	24.39 ± 0.64 cB
B/ (mg·kg ⁻¹)	I	72.27 ± 1.70 aC	109.91 ± 1.17 aB	123.51 ± 3.26 aA
	II	65.36 ± 5.34 aB	89.20 ± 1.36 cA	101.74 ± 1.72 bA
	III	67.91 ± 3.72 aB	98.93 ± 3.89 bA	102.23 ± 1.70 bA
	IV	43.69 ± 2.17 bC	105.22 ± 1.78 abA	91.00 ± 1.60 cB

试验以 Olsen J^[16] 的核桃叶片分析解释所示元素的正常临界范围为依据, 综合不同焦枯叶片矿质元素间、病情程度与矿质元素间的相关性分析和矿质元素与病情程度的多元有序 Logistic 回归分析, 并通过喷肥试验验证, 为找出核桃叶片焦枯发生的原因以及精准施肥提供了参考。

Fe 虽然不是叶绿素的成分, 但在叶绿素的卟啉环形成中起作用, 直接参与光系统 I、光系统 II 和细胞色素复合物的形成^[17-18]。植物缺 Fe 时, 叶绿体结构发育不完整, 长度和厚度下降, 片层结构异常和模糊, 基粒数目减少。严重缺 Fe 时叶绿体会变小、甚至解体或液泡化, 因此 Fe 含量与叶绿素含量成正相关, 缺 Fe 直接导致植物失绿黄化, 严重时, 除靠近叶柄处的部分呈绿色外, 其它均呈黄色至白色, 叶片逐级失去光泽, 叶缘也易发生破裂, 甚至枯死^[19-20]。本研究中, Fe 含量在临界范围内波动, 且与病情程度与相关性不显著, 认

为 Fe 对核桃叶片光合色素含量的降低没有明显影响。

Mn 是植物叶绿体的组成部分, 它维护叶绿体膜结构叶片, 直接参与植物的光合作用, 光系统 II 中有一种锰蛋白, 参与催化水分解反应, 催化氧的释放, 并向类囊体偶联的电子传递链提供电子, 因此缺 Mn 会导致叶片的光合能力降低^[21-22], 叶片失绿、脉间黄化, 叶脉仍为绿色; 有时出现一系列的黄褐色或黑褐色斑点; 有时叶片发皱、卷曲, 甚至凋萎^[23]。本研究中, 病情程度与 Mn 含量呈极显著负相关, 但 Mn 含量在临界范围内波动且回归结果不显著, 在一定程度上或许可认为光合色素含量的下降与 Mn 含量的下降有关。

Cu 在光合作用、呼吸作用和防止氧化应激方面发挥着重要作用。质体蓝蛋白是最丰富的铜蛋白, 参与细胞色素 b6f 复合物与类囊体腔中的光系统 I 之间的电子传递。由于缺乏质体蓝素, 缺 Cu 会导致光合电子传递缺陷。植物表现出叶部焦化枯萎和皱缩落叶。表皮逐渐出现深褐色, 枝条回退枯萎, 枝条附近的树皮上出现小黑褐色病斑^[24]。

B 在植物中的主要功能是维持细胞壁的结构和功能, 这种元素形成鼠李糖乳糖醛酸-II-B (RG-II-B) 复合物, 稳定果胶网络并调节细胞壁孔的大小^[25]; B 还参与核酸和糖的代谢、蛋白质的合成、磷代谢、苯酚和含氮化合物代谢以及激素调节等^[26]。B 缺乏叶片生长发育迟缓, 尖端肿胀, 卷曲发黄, 严重情况下死亡; B 过量则表现为褪绿或坏死斑块, 通常出现在成熟叶片的边缘和尖端^[27-28]。本研究中, 病情程度与 B 含量呈极显著负相关, 而 B 随焦枯程度的增加, 其含量呈逐渐下降且低于正常临界范围, 对焦枯程度有显著的负向影响关系, 且呈现出 0.05 水平的显著性。B 含量显著下降, 可能是核桃果实在膨大期的需 B 量较大, B 转运到了果实中而叶片又不能土壤中得到有效补充, 叶片 B 的生理功能出现紊乱^[29], 从而出现缺 B 的症状。使叶片的光合色素含量下降, 发生焦枯现象。

为进一步验证缺 B 导致的叶片焦枯, 选择发生焦枯的‘绿岭’核桃进行叶面喷硼肥试验后发现, 喷施不同浓度的 B 肥后, 叶片的光合色素含量、Mn、Zn、B 元素含量增加, 叶片 N、P、K 元素含量降低, 各矿质元素含量均在临界范围内波动, 叶片表现形态正常无焦枯现象发生, 焦枯症状得到了有效缓解, 与姜存仓等^[30]对脐橙的研究相似。

4 结 论

本研究分析‘绿岭’核桃焦枯叶片 11 种矿质元素含量的关系, 并进行喷肥试验后证实缺 B 是导致‘绿岭’核桃叶片焦枯的最主要原因, 为核桃生产栽培管理提供了理论参考。

参 考 文 献:

- [1] 孟 佳, 方晓璞, 史宣明, 等. 我国核桃产业发展现状、问题与建议[J]. 中国油脂, 2023, 48 (1): 84-86 + 103.
- [2] Analysis of China's walnut production, export, and apparent consumption in 2023 (Figure)[EB/OL]. [2023-05-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1767208844632501267&wfr=spider&for=pc>
- [3] 唐书玉, 胡安鸿. 核桃焦叶病防治技术及防治效果[J]. 农村科技, 2019 (5): 26-28.
- [4] 张 炎, 曹 振, 周慧梅, 等. 琯溪蜜柚叶片黄化与缺镁的关系及叶面补镁的矫治效果[J]. 果树学报, 2021, 38 (8): 1319-1329.
- [5] 李 源, 蒲胜海, 马晓鹏, 等. 核桃叶片焦枯症特征与成因分析[J]. 新疆农业科学, 2022, 59 (6): 1475-1481.
- [6] 张计峰, 梁 智, 邹耀湘, 等. 新疆南疆核桃叶缘焦枯病成因分析研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49 (7): 1261-1265.
- [7] 郭全恩, 王益权, 郭天文, 等. 甘肃省秦安县苹果叶缘焦枯死亡原因调查[J]. 北方园艺, 2008 (8): 27-29.
- [8] 徐 阳, 龚榜初, 刘同祥, 等. ‘次郎’甜柿果实矿质元素与果实品质关系研究[J]. 林业科学研究, 2020, 33 (4): 108-116.
- [9] 李萧婷, 包建平. 产量与吊干杏花芽矿质营养的关联分析[J]. 分子植物育种, 2024, 22 (4): 1186-1192.
- [10] HATTON R G, GREBB N H. Field observations on the incidence of leaf scorch upon the apple[J]. Journal of Pomology and Horticultural Science, 2015, 4(2): 65-77.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-137.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263-279.
- [13] MARIA C, TRAIAN F. The study of manganese content in soil, wheat grain and wheat plants[J]. Ovidius University Annals of Chemistry, 2003, 14(1): 9-11.
- [14] ALESSANDRO M, LAURA E, MARCO M. Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese[J]. Agronomy Journal, 1996, 88(6): 937-943.
- [15] 郭向华, 李保国, 齐国辉, 等. 核桃叶片早衰与叶片矿质元素含量的关系[J]. 林业科学, 2007, 43 (2): 111-114.
- [16] OLSEN, J. Growing walnuts in Oregon[J]. Corvallis Or Extension Service Oregon State University, 2006, EM8907: 1-8.
- [17] DAS U, RAHMAN M M, ROY Z R, et al. Morpho-physiological retardations due to iron toxicity involve redox imbalance rather than photosynthetic damages in tomato[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 156: 55-63.
- [18] VAROTTO C, MAIWALD D, PESARWSI P, et al. The metal ion transporter IRT1 is necessary for iron homeostasis and efficient photosynthesis in *Arabidopsis thaliana*[J]. The Plant Journal, 2002, 31(5): 589-599.
- [19] BASHIR H, QURESHI M I, IBRAHIM M M, et al. Chloroplast and photosystems: Impact of cadmium and iron deficiency[J]. Photosynthetica, 2015, 53(3): 321-335.
- [20] KROH G E, PILON M. Iron deficiency and the loss of chloroplast iron-sulfur cluster assembly trigger distinct transcriptome changes in *Arabidopsis rosettes*[J]. The Royal Society of Chemistry, 2020, 12(11): 1748-1764.
- [21] SCHMIDT S B, JENSEN P E, HUSTED S. Manganese deficiency in plants: The impact on photosystem II[J]. Trends in Plant Science, 2016, 21(7): 622-632.
- [22] NICKELSEN J R, RENGSTL B. Photosystem II assembly: From cyanobacteria to plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64(1): 609-635.
- [23] 宫峥嵘, 王一峰, 王 瀚, 等. 核桃矿质营养研究进展[J]. 林业科学, 2021, 57 (1): 178-190.
- [24] PETRA M. Mineral nutrition of higher plants, 2nd Edn[M]. Academic Press: 2012: 333-346.
- [25] MATOH T. Boron in plant cell walls[J]. Plant and Soil, 1997, 193: 59-70.
- [26] GIMENO V, SIMON I, NIEVES M, et al. The physiological and nutritional responses to an excess of boron by Verna lemon trees that were grafted on four contrasting rootstocks[J]. Trees, 2012, 26(5): 1513-1526.
- [27] BROWN P H, BELLALOU I, Wimmer M A, et al. Boron in plant biology[J]. Plant Biology, 2002, 4(2): 205-223.
- [28] SIMON G S, NIEVES M, MARTINEZ N J, et al. Response of three citrus genotypes used as rootstocks grown under boron excess conditions[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 159: 10-19.
- [29] 盛 鸥, 严 翔, 彭抒昂, 等. 纽荷尔脐橙果实发育期叶片不同形态硼含量与缺硼的关系[J]. 园艺学报, 2007 (5): 1103-1110.
- [30] 姜存仓, 王运华, 刘桂东, 等. 赣南脐橙叶片黄化及施硼效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (3): 656-661.

Correlation Analysis between Physiological Scorch and Mineral Elemental Contents in Walnut Leaves

WANG Xia-lei¹, LIANG Xin-miao¹, LIU Jia-le¹, JIA Peng¹, CHEN Li-ying^{2,3,4}, QI Guo-hui^{1,2,4}

(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. Hebei Walnut Technology Innovation Center, Lincheng 054300, Hebei, China; 3. Hebei Lvling Fruit Industry Co., Ltd., Lincheng 054300, Hebei, China; 4. Hebei (Xingtai) Walnut Industry Technology Research Institute, Lincheng 054300, Hebei, China)

Abstract: [Objective] In this study, the mineral elements and other indicators of walnut leaves were measured and analyzed by the method of leaf nutrition diagnosis, in order to determine the causes of walnut leaf scorching, and then provide a theoretical basis for walnut production, cultivation and management. [Methods] Walnut trees were graded according to the degree of leaf scorch, the contents of mineral elements (N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B) and chlorophyll in walnut leaves at different scorch degrees and at different periods were measured. And analyze the correlation among mineral elements, and between mineral elements and scorch degree. [Results] The results showed that the contents of photosynthetic pigment in leaves decreased with the increase of scorching degree. The scorching phenomenon developed from the edge to the middle part of the leaves. The degree of illness was significantly positively correlated with N content ($R=0.63$), significantly positively correlated with P content ($R=0.76$), and significantly negatively correlated with Mn and B content, with correlation coefficients of -0.73 and -0.91 , respectively. The parameter estimated of the content of B in the Logistic regression was -0.872 ($p<0.05$), indicating that B content had a significant negative impact on the degree of scorch. And after spraying different concentrations of B fertilizer, the symptoms of scorching and withering were effectively alleviated. [Conclusion] Lack of B is the main reason for the scorching of 'Lyuling' walnut leaves.

Keywords: walnut leaves; mineral elements; physiological scorch

(责任编辑: 崔 贝)