果 树 学 报 2019,36(9):1161-1170
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20190167

大兴安岭地区笃斯越橘果实成熟期叶片矿质元素营养诊断

张继舟[1,2],李云影[1],袁 磊[2],吕 品[2],于志民[2],王立民[2],张 悦[2*]

([1]东北农业大学资源与环境学院,哈尔滨 150030;[2]黑龙江省科学院自然与生态研究所·湿地与生态保育国家地方联合工程实验室,哈尔滨 150040)

摘 要:【目的】通过对大兴安岭地区笃斯越橘叶片矿质元素的研究,为笃斯越橘人工抚育、栽培中合理施肥提供理论依据。**【方法】**以4种生境中的笃斯越橘为试材,通过测定果实成熟期叶片中N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu和Zn的含量及产量,制定笃斯越橘叶片矿质元素含量适宜值,并应用DOP法进行营养诊断。**【结果】**(1)水湿地生境中笃斯越橘的产量高,林下疏林中的产量中等,而林缘坡地中的产量低。(2)叶片中N的适宜值为17.70~19.67 g·kg^{-1},P的适宜值为3.56~4.60 g·kg^{-1},K的适宜值为5.22~6.13 g·kg^{-1},Ca的适宜值为3.13~3.88 g·kg^{-1},Mg的适宜值为1.90~2.27 g·kg^{-1},Fe的适宜值为109.19~158.85 mg·kg^{-1},Mn的适宜值为262.05~311.14 mg·kg^{-1},Cu的适宜值为5.44~6.42 mg·kg^{-1},Zn的适宜值为17.33~24.87 mg·kg^{-1}。(3)高产区的笃斯越橘叶片养分平衡状况优于中低产区,且高产区笃斯越橘叶片矿质养分亏缺程度较高,而中、低产区域矿质养分则过多盈余。**【结论】**大兴安岭地区高产区域的笃斯越橘养分平衡状况优于中低产区域。在适当补充肥料的基础上各区均具有一定的产量提升空间。

关键词:笃斯越橘;大兴安岭地区;叶片矿质元素;不同生境;营养诊断

中图分类号:S666.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2019)09-1161-10

A study on leaf mineral nutrition diagnosis in *Vaccinium uliginosum* L. at fruit ripening stage in the Greater Khingan Mountains

ZHANG Jizhou[1,2], LI Yunying[1], YUAN Lei[2], LÜ Pin[2], YU Zhimin[2], WANG Limin[2], ZHANG Yue[2*]

([1]*College of Resources and Environmental Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China;* [2]*Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences/National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin 150040, Heilongjiang, China*)

Abstract:【Objective**】**Leaf is very sensitive to mineral element supply, and the contents of mineral elements in the leaf represent the utilization of nutrients of the tree. Leaf nutrition diagnosis is an effective means to evaluate the nutrition status of the tree and provides an important basis to understand the fertilizer requirement of the tree. In this study, the theoretical basis for rational fertilization scheme for the cultivation of *V. uliginosum* was provided by determining suitable value of mineral element contents in the leaves and nutrition diagnosis was implemented to the orchards in the Greater Khingan Mountains. **【**Methods**】**The study was carried out in the Greater Khingan Mountains areas in China. *V. uliginosum* grown in four types of biotopes (meadow bog with soil layer, meadow bog without soil layer, undergrowth sparse forest, and slope land of forest edge)were used as the test the materials. A total of 66 samples of leaves and fruit were collected during the ripening stage in August 2018. Total nitrogen (N) in the leaf was analyzed using an elemental analyzer (EURO EA3000, Italy). Samples for total phosphorus (P) and potassium (K) analysis were digested using H_2SO_4-H_2O_2 and determined using an ultraviolet visible spectrophotometer (Thermo Fisher Evolution300, USA) and an atomic absorption spectrophotometer (Thermo Fisher 3500, USA), respectively. Calcium (Ca), magnesium (Mg), manganese (Mn), iron (Fe),

收稿日期:2019-04-24 接受日期:2019-06-06

基金项目:国家十三五重点研发计划(2016YFC0500300);黑龙江省科学基金面上项目(C2017060)

作者简介:张继舟,男,副研究员,在读博士研究生,主要从事土壤环境的研究工作。Tel:13766802596,E-mail:jizhou1980229@126.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13704519798, E-mail:zyszy1962@163.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

copper (Cu) and zinc (Zn) were determined using an atomic absorption spectrophotometer after digestion using HNO_3-$HClO_4$ (3∶1). Fruit yield of per unit area was collected, and the high-yield, middle-yield and low-yield regions were determined using K-means cluster analysis of SPSS 20.0. The suitable mineral element contents in the leaf of *V. uliginosum* were determined by probability grading method and the high-yield area method. Nutrient balance condition in the leaves of trees grown in the high-, middle- and low-yield regions was quantified by the nutrient imbalance index (NBI_m), and the degree of mineral nutrient deficiency and the order of fertilizer requirement were diagnosed according to the deviation from optimum percentage (DOP).【Results】(1) In the wetland biotope of Greater Khingan Mountains region, the yield of *V. uliginosum* was the highest (high yield region); the *V. uliginosum* growing in the undergrowth sparse forest biotope had a medium productivity (middle-yield region); and the *V. uliginosum* growing in the forest edge slope biotope had the lowest yield (low-yield region). (2) The average content of major elements in the leaves in descending order was N > K > P > Ca > Mg; the average content of trace elements was in the order of Mn > Fe > Zn > Cu. The coefficient of variation of the contents of the nine mineral elements was between 8.95% and 36.10%, and the largest was Zn, and the smallest was N. Except for N with weak spatial variation, all the other elements showed moderate spatial variation. The overall variation degree of the 9 element contents was in the order of Zn＞Fe＞Ca＞P＞Mg＞Mn＞Cu＞K＞N. The contents of N, P, K, Fe, Mn and Cu in the leaves of *V. uliginosum* in the high-yield regions were lower, and the contents of Ca, Mg and Zn were higher than those in the low- and middle-yield regions. (3) There were positive correlations between Zn and Mg ($p < 0.01$), P and Fe, and Ca and Mg ($p < 0.05$) in the high-yield regions. There were positive correlations between Mg and Zn（$p < 0.01$）and between P and Mn ($p < 0.05$), and negative correlations between P and Ca and between K and Mg ($p < 0.05$) in the middle-yield regions. There were a positive correlation between Fe and Cu ($p < 0.05$) and negative correlations between Ca and Cu and between Mg and Mn in the low-yield regions ($p < 0.05$). At the same time, there was a significant positive correlation between Zn and yield ($p < 0.05$), while a very significant positive correlation between K and yield ($p < 0.01$). The results showed that the synergetic and antagonistic effects of mineral elements were coexisting in the middle- and low-yield regions, while in the high yield-regions, synergetic effect dominated, and the importance of Zn and K to the productivity of *V. uliginosum* was revealed. (4) The suitable value of N content in the leaf of *V. uliginosum* was 17.90 to 19.67 $g \cdot kg^{-1}$, P 3.56 to 4.60 $g \cdot kg^{-1}$, K 5.22 to 6.13 $g \cdot kg^{-1}$, Ca 3.13 to 3.88 $g \cdot kg^{-1}$, Mg 1.90 to 2.27 $g \cdot kg^{-1}$, Fe 109.19 to 158.85 $mg \cdot kg^{-1}$, Mn 262.05 to 311.14 $mg \cdot kg^{-1}$, Cu 5.44 to 6.42 $mg \cdot kg^{-1}$, and Zn 17.33 to 24.87 $mg \cdot kg^{-1}$. (5) According to the nutrient imbalance index (NBI_m), the nutrient balance of *V. uliginosum* leaves in the high-yield regions was better than that in the middle- and low-yield regions. DOP diagnosis showed that N, Fe and Mn in the leaves of *V. uliginosum* in the high-yield regions were low; P, K and Cu were deficient; Mg was high, and Ca and Zn were excessive. The order of fertilizer requirement was P > K > Cu > Mn > Fe > N. P, Ca and Mg in the leaves of *V. uliginosum* in the middle-yield regions were low, Zn was deficient, N, Mg and Cu were high, and Fe was excessive, and the order of fertilizer requirement was Zn>P>Ca>Mg. Mg in the leaves of *V. uliginosum* in the low-yield regions was equilibrium; N and Ca were low; the Zn was deficient; K, Mn and Cu were high; and P and Fe were excessive. The order of fertilizer requirement being Zn>N>Ca.【Conclusion】The yield can be further increased by applying N, P, K, Fe, Mn and Cu fertilizers in high production areas; the yield in the middle-yield areas could be increased by P, Ca, Mg and Zn application; and N, Ca and Zn fertilizers are needed in the low-yield areas for yield increase. All the areas had rooms for yield improvement.

Key words: *Vaccinium uliginosum* L.; The Greater Khingan Mountains; Leaf mineral elements; Different biotopes; Nutrition diagnosis

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

笃斯越橘（*Vaccinium uliginosum* L.）为杜鹃花科（Ericaceae）越橘属（*Vaccinium*）多年生小灌木，主要分布于我国大、小兴安岭及长白山地区[1]，其中大兴安岭地区占我国笃斯越橘总储量的70%[2]，其果实中花青素及黄酮类物质含量高于我国其他地区的蓝莓栽培品种，营养及保健价值极高[2-4]，是极具开发价值的天然寒地浆果资源[5]。笃斯越橘主要生长于湿地、湿润的疏林地和林缘坡地等三类生境，资源总体处于野生状态，生长发育所需的矿质养分主要来源于地表深厚的腐殖质层。不同生境中笃斯越橘产量相差较大，矿质营养元素的摄取可能是决定该差异的关键[6-7]。

果树叶片对矿质元素反应极为敏感，所含的矿质元素含量可代表树体对养分的利用状况，它既是土壤矿质元素的贮库，又是果实发育所需养分的供源[8]。叶片营养诊断是评价果树营养状况的有效手段，是掌握果树需肥规律的重要依据。叶片矿质营养诊断方法目前主要有DRIS法[9]（营养诊断施肥建议综合法）、CND法[10]（养分成分诊断法）及DOP法[11]（适宜值偏差百分数法）。这三种方法均可对果树及作物进行有效的营养诊断，但DRIS法及CND法数据计算复杂，较难理解的缺点，且对生产力水平较低的果树的诊断效果欠佳[11]，而DOP法计算简单，易推广，不仅可阐明果树对矿质元素的需求顺序，亦可直接测量元素的含量偏差，同时可对生产力水平较低的果树产生较好的诊断效果，目前已经成功的用于梨[11]、葡萄[12]、脐橙[13]等果树的矿质营养诊断。

近些年，笃斯越橘露天人工种植在大兴安岭地区获得成功，但由于对其养分需求状况缺乏深刻认知，生长及产量受到限制[14-15]。李亚东等[16]对长白山笃斯越橘做了较简单的研究，初步得出几种矿质元素的含量适宜值。白永超等[17]对大兴安岭地区不同生境笃斯越橘的叶片矿质元素含量进行了研究，获得了不同生境中笃斯越橘的叶片矿质元素含量。这些研究采集的样点数量相对较少，且未应用营养诊断技术对笃斯越橘的需肥规律进行更深入研究。由于大兴安岭地区笃斯越橘具有储量和品质双重优势，开展笃斯越橘矿质营养诊断研究具有十分重要的应用价值。

本研究以大兴安岭地区不同生境笃斯越橘天然种群为对象，在概率分级法的基础上，进一步应用DOP法对笃斯越橘的叶片进行矿质营养诊断，旨在明确大兴安岭地区笃斯越橘叶片矿质元素的含量适宜值及需肥顺序，以期为笃斯越橘野生种群抚育促产和人工种群丰产栽培提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　研究区域概况

2018年8月，以黑龙江大兴安岭阿木尔林业局为研究区域（N52° 15′ 03″ ~ 53° 33′ 15″，E122° 38′30″ ~ 124°05′05″），海拔范围248~1 397 m，年均气温-5 ℃，年均降水量约455 mm，年无霜期90~120 d，属寒温带大陆性季风气候。阿木尔林业局笃斯越橘总蕴藏量占大兴安岭地区的50%以上。

按文献[5，18]中笃斯越橘的生境分类法，将研究区域分为水湿地有土壤、水湿地无土壤、疏林及林缘坡地4种生境类型。其中，Ⅰ.水湿地有土壤生境，笃斯越橘的根系层主要为腐殖质及草甸土，主要伴生植物为落叶松（*Larix gmelini*）、白桦（*Betula platyphylla*）、柴桦（*Betula fruticosa*）、杜香（*Ledum palustre*）；Ⅱ.水湿地无土壤生境，笃斯越橘的根系插入以苔草及苔藓根系为主的根系盘结层内，主要伴生植物包括苔草（*Carex* spp.）、落叶松、白桦和柴桦等；Ⅲ.疏林下生境，笃斯越橘的根系层以棕色针叶林土为主，腐殖质含量较高，主要伴生植物包括落叶松、白桦、红豆越橘（*Vaccinium vitis*）及忍冬（*Lonicera caerulea*）；Ⅳ.林缘坡地生境，笃斯越橘的根系层以棕色针叶林土为主，但仅含有少许腐殖质，且石块较多，主要伴生植物包括落叶松、红豆越橘、白桦及兴安杜鹃（*Rhododendron dauricum*）。

1.2　样品的采集与分析

1.2.1　样品采集及处理　在研究区内共选择66个笃斯越橘集中分布区域采集叶片及果实样品。每个区域设置1个10 m×10 m的样方，每个样方中按“Z”形采集植株的叶片及果实，在大样方内设立20个1 m×1 m的标准样方，记录样方内笃斯越橘的丛数，随机选择3丛，记录果粒数量。以笃斯越橘3~4 a基生枝条为代表枝条，采集新梢中部叶片200枚作为1个叶片样品，并采集大小适中成熟的果实1 000粒以上，在其中随机分出1 000粒称重，并通过（公式1）计算单位面积产量。将采集的叶片带回实验室用去离子水洗净，晾干，105 ℃杀青30 min，80 ℃烘干、粉碎、过筛后储存备用。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$Y=\frac{G\times N\times \bar{M}}{1\,000\times S}。\quad (1)$$

Y为单位面积笃斯越橘产量，单位为$g\cdot m^{-2}$；G代表千粒重，单位g•千粒$^{-1}$；N为20个样方中笃斯越橘丛数，单位为丛；$\overline{M}$为每丛笃斯越橘果粒数，单位为粒；S为采集区样方面积，单位为m^2。

1.2.2 叶片矿质元素含量的测定 叶片的N素应用元素分析仪（EURO EA 3000，意大利）测定，全P及全K经H_2SO_4-H_2O_2消煮后，分别应用钼锑抗比色法（Thermo Fisher 3500，美国）及火焰原子吸收分光光度法（Thermo Fisher Evolution 300，美国）测定[19]，Ca、Mg、Mn、Fe、Cu及Zn经HNO_3-$HCLO_4$(3∶1)混合消解，应用火焰原子吸收分光光度法测定[20]。

1.3 叶片矿质元素的概率分级方法

在叶片矿质元素含量值测定后，经SPSS 20.0中的探索性分析检验是否服从正态分布，对于服从正态分布的矿质元素应用概率分级法将其分为缺乏、低值、正常值、高值、过高5个级别，对应的概率分别为10%、20%、40%、20%和10%。含量值在(平均值−0.524 6×标准差)～(平均值+0.524 6×标准差)为正常值范围，即适宜值；对于不符合正态分布的矿质元素，应用高产区域的叶片矿质元素含量值对概率分级法进行矫正，最终得出大兴安岭地区笃斯越橘叶片矿质元素含量适宜值。

1.4 DOP法指数的计算

“适宜值偏差百分数法”（简称DOP）是Montanes等[11]于1993年提出的，该法是一种简便的营养诊断方法，计算公式如下：

$$DOP_x=[(C_x\times 100)/C_m]-100。\quad (2)$$

[11,21]

其中：DOP_x为叶片营养诊断指数，C_x为叶片中某矿质元素的含量，C_m为该元素的适宜值含量(本文中使用最终确定的适宜值的平均值)。

$$NBI_m(\text{营养不平衡指数})=\Sigma|DOP_x|/n。\quad (3)$$

其中：n为被诊断矿质元素的个数。当$|DOP_x|\leqslant NBI_m$时表示含量正常，$DOP_x<0$，且$|DOP_x|>NBI_m$时表示缺乏，$DOP_x>0$，且$|DOP_x|>NBI_m$时表示过量。

1.5 数据处理

用SPSS 20.0（IBM公司）软件对试验数据进行描述性统计，应用其中的探索性分析检验数据是否服从正态分布，应用K均值聚类分析，划分高产区、中产区及低产区。应用Origin 2017及Excel 2010绘制图表。

2 结果与分析

2.1 笃斯越橘不同产量区的划分

图1为不同生境笃斯越橘产量的箱型图，可知，水湿地有土壤生境的产量范围为78.20~118.73 $g\cdot m^{-2}$，

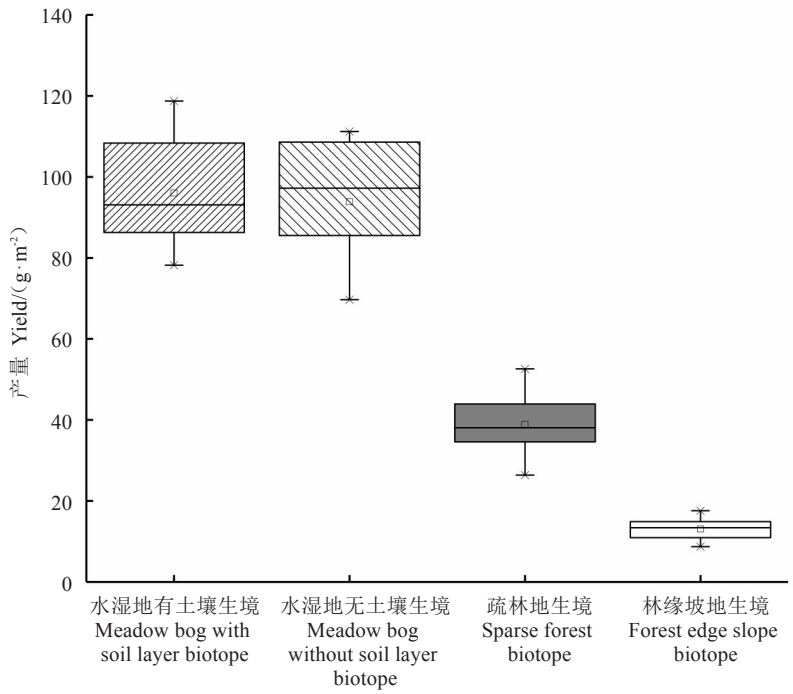

图1 大兴安岭不同生境笃斯越橘果实产量

Fig. 1 Fruit yield of *V. uliginosum* under different biotopes in Greater Khingan Mountains

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平均产量为96.04 g·m^{-2}，变异系数为13.34%；水湿地无土壤生境的产量在69.70~111.20 g·m^{-2}，平均产量为93.84 g·m^{-2}，变异系数为14.43%；林下疏林生境的产量范围为26.40~52.60 g·m^{-2}，平均产量为38.88 g·m^{-2}，变异系数为16.79%；林缘坡地生境的产量在8.70~17.60 g·m^{-2}，平均产量为13.11 g·m^{-2}，变异系数为19.37%。各生境产量均为空间中等程度变异，其中山地类型生境大于水湿地类型生境。产量明显表现为水湿地生境>林下疏林生境>林缘坡地生境。应用SPSS 20.0中的K均值聚类法，将笃斯越橘产量分为高产区域、中产区域及低产区域三部分。其中高产区恰好为水湿地生境（*n*=21），中产区域为林下疏林生境（*n*=33），低产区域为林缘坡地生境（n=12）。

2.2　笃斯越橘叶片矿质营养元素含量的特征

笃斯越橘叶片中9种矿质元素含量的描述性统计见表1，可知，常量元素含量平均值从大到小依此为：N＞K＞P＞Ca＞Mg；微量元素含量平均值从大到小依此为：Mn＞Fe＞Zn＞Cu。9种矿质元素含量的变异系数为8.95%~36.10%，最大的是Zn，最小的是N，除N含量呈空间弱变异外，其他元素均呈空间中等程度变异。9种元素含量的总体变异程度由大到小的排列顺序为：Zn＞Fe＞Ca＞P＞Mg＞Mn＞Cu＞K＞N。高产区笃斯越橘叶片中N、P、K、Fe、Mn和Cu含量低于中低产区，而Ca、Mg和Zn的含量高于中低产区。

表1　笃斯越橘叶片中矿质元素含量与产量的描述性统计

Table 1　Descriptive statistics of mineral elements in the leaf and the yield of *V. uliginosum*

			最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 *CV*/%
全区 All region *n*=66	常量元素 Major element	N/(g·kg^{-1})	15.50	21.91	18.78	1.68	8.95
		P/(g·kg^{-1})	2.41	6.38	4.12	0.83	20.15
		K/(g·kg^{-1})	4.47	7.64	5.70	0.71	12.46
		Ca/(g·kg^{-1})	2.13	5.21	3.51	0.72	20.51
		Mg/(g·kg^{-1})	1.25	2.99	2.08	0.36	17.31
	微量元素 Trace element	Fe/(mg·kg^{-1})	70.96	257.47	141.22	47.52	33.65
		Mn/(mg·kg^{-1})	161.67	375.07	286.60	46.79	16.33
		Cu/(mg·kg^{-1})	3.97	8.68	5.92	0.94	15.88
		Zn/(mg·kg^{-1})	10.34	47.86	22.27	8.04	36.10
高产区 High-yield region *n*=21	常量元素 Major element	N/(g·kg^{-1})	15.71	21.43	18.45	1.36	7.37
		P/(g·kg^{-1})	2.41	5.83	3.97	0.88	22.17
		K/(g·kg^{-1})	4.55	6.31	5.30	0.52	9.81
		Ca/(g·kg^{-1})	2.13	5.21	3.73	0.82	21.98
		Mg/(g·kg^{-1})	1.25	2.99	2.12	0.46	21.70
	微量元素 Trace element	Fe/(mg·kg^{-1})	82.76	257.47	129.73	47.73	36.79
		Mn/(mg·kg^{-1})	161.67	372.19	278.66	60.75	21.80
		Cu/(mg·kg^{-1})	3.97	7.72	5.76	1.09	18.92
		Zn/(mg·kg^{-1})	14.81	30.38	22.39	4.58	20.46
中产区 Middle-yield region *n*=33	常量元素 Major element	N/(g·kg^{-1})	15.86	21.91	18.96	1.68	8.86
		P/(g·kg^{-1})	2.89	5.19	3.98	0.68	17.09
		K/(g·kg^{-1})	4.47	7.64	5.86	0.70	11.95
		Ca/(g·kg^{-1})	2.20	4.62	3.39	0.69	20.35
		Mg/(g·kg^{-1})	1.58	2.75	2.06	0.33	16.02
	微量元素 Trace element	Fe/(mg·kg^{-1})	70.96	238.25	146.08	49.35	33.78
		Mn/(mg·kg^{-1})	201.09	375.07	285.70	39.93	13.98
		Cu/(mg·kg^{-1})	4.61	8.68	6.00	0.89	14.83
		Zn/(mg·kg^{-1})	10.34	34.70	20.04	6.40	31.94
低产区 Low-yield region *n*=12	常量元素 Major element	N/(g·kg^{-1})	15.50	21.61	18.87	2.19	11.61
		P/(g·kg^{-1})	3.37	6.38	4.76	0.87	18.28
		K/(g·kg^{-1})	4.64	6.92	5.98	0.78	13.04
		Ca/(g·kg^{-1})	2.32	4.24	3.43	0.54	15.74
		Mg/(g·kg^{-1})	1.70	2.34	2.10	0.21	10.00
	微量元素 Major element	Fe/(mg·kg^{-1})	86.34	231.16	147.97	41.75	28.22
		Mn/(mg·kg^{-1})	254.65	356.53	302.96	34.21	11.29
		Cu/(mg·kg^{-1})	4.93	7.12	6.01	0.81	13.48
		Zn/(mg·kg^{-1})	11.86	47.86	25.72	10.60	41.21

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3 笃斯越橘叶片中各元素及产量的相关分析

大兴安岭地区高产区域、中产区域和低产区域的笃斯越橘叶片中矿质元素间的相关性存在差异（表2），高产区域叶片Zn-Mg之间呈极显著正相关（$p < 0.01$），P-Fe和Ca-Mg之间呈显著正相关（$p < 0.05$）；中产区域叶片Mg-Zn之间呈极显著正相关（$p < 0.01$），P-Mn之间呈显著正相关（$p < 0.05$），P-Ca和K-Mg之间呈显著负相关（$p < 0.05$）；低产区域叶片Fe-Cu之间呈显著正相关（$p < 0.05$），Ca-Cu和Mg-Mn之间呈显著负相关（$p < 0.05$）。表明中、低产区域矿质元素间协同与拮抗作用共存，而高产区域主要以协同为主。表3为大兴安岭地区笃斯越橘叶片矿质元素与产量间的相关性，可知，Ca、Mg和Zn元素与产量之间正相关，其余均呈负相关，其中Zn与产量之间达到显著正相关（$p < 0.05$），而K与产量之间呈极显著正相关性（$p < 0.01$）。

表2 大兴安岭笃斯越橘高产、中产及低产区域叶片矿质元素含量相关性

Table 2 Correlation of leaf mineral element contents in *V. uliginosum* in high-yield, middle-yield and low-yield regions in Greater Khingan Mountains

		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
高产区域 High-yield region *n*=21	N	1	0.201	-0.281	-0.053	0.216	0.069	-0.306	0.108	-0.061
	P		1	-0.062	-0.011	0.218	0.535*	0.149	-0.102	0.076
	K			1	-0.334	-0.119	0.172	0.407	-0.161	-0.124
	Ca				1	0.447*	-0.066	-0.424	0.163	0.271
	Mg					1	0.387	-0.282	0.226	0.783**
	Fe						1	-0.035	0.396	0.229
	Mn							1	-0.34	-0.154
	Cu								1	0.271
	Zn									1
中产区域 Middle-yield region *n*=33	N	1	-0.219	0.061	0.018	-0.292	-0.141	-0.264	-0.067	-0.159
	P		1	-0.016	-0.361*	0.134	0.188	0.363*	-0.296	0.323
	K			1	-0.178	-0.398*	0.027	0.071	0.158	-0.052
	Ca				1	0.224	-0.297	-0.136	-0.161	0.199
	Mg					1	0.047	-0.234	-0.068	0.568**
	Fe						1	0.323	0.260	0.115
	Mn							1	0.052	-0.079
	Cu								1	0.022
	Zn									1
低产区域 Low-yield region *n*=12	N	1	-0.229	0.115	-0.295	-0.054	-0.231	-0.045	0.056	-0.060
	P		1	0.032	-0.343	0.295	0.113	-0.173	0.227	0.018
	K			1	-0.211	-0.418	0.263	0.457	0.574	-0.112
	Ca				1	0.018	-0.547	-0.352	-0.584*	0.035
	Mg					1	-0.214	-0.701*	-0.222	-0.212
	Fe						1	0.364	0.626*	0.322
	Mn							1	0.527	-0.338
	Cu								1	0.035
	Zn									1

注：*和**分别表示在 5%和 1%水平显著相关。

Note: * and ** indicate a significant correlation at 5% and 1%, respectively.

2.4 笃斯越橘叶片矿质营养元素含量适宜值划分

SPSS 20.0软件中探索性检验分析表明，笃斯越

表3 大兴安岭笃斯越橘叶片矿质元素含量与产量的相关性

Table 3 Correlation between mineral elements content in the leaves and the yield of *V. uliginosum in* Greater Khingan Mountains

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
产量 Yield	-0.162	-0.209	-0.401**	0.198	0.069	-0.162	-0.159	-0.074	0.294*

注：*和**分别表示在 5%和 1%水平显著相关。

Note: * and ** indicate a significant correlation at 5% and 1%, respectively.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

橘叶片中N、Ca、Mg、Mn和Cu含量服从正态分布，而P、K、Fe和Zn含量不服从正态分布（表4）。对于符合正态分布的5种元素，我们应用概率分级法对其含量值进行划分，分别为缺乏、低值、适宜值、高值、过高5个含量等级，各等级样本出现概率分别为10%、20%、40%、20%和10%，所对应的4个分级点依次为（平均值−1.281 8×标准差）、（平均值−0.524 6×标准差）、（平均值+0.524 6×标准差）及（平均值 +1.2818×标准差）。其中第3级[(平均值−0.524 6×标准差)~(平均值+0.524 6×标准差)]为适宜值范围，与高产区笃斯越橘叶片矿质元素含量均值接近（表5）。

表4　笃斯越橘叶片矿质营养元素含量正态性检验

Table 4 The normality test of leaf mineral elements contents in leaf of *Vaccinium uliginosum* L.

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	Df	Sig.
N*	0.078	66	0.200*	0.965	66	0.057
P	0.101	66	0.094	0.980	66	0.355
K	0.102	66	0.085	0.973	66	0.153
Ca*	0.061	66	0.200*	0.985	66	0.604
Mg*	0.055	66	0.200*	0.990	66	0.886
Fe	0.118	66	0.023	0.927	66	0.001
Mn*	0.067	66	0.200*	0.983	66	0.521
Cu*	0.082	66	0.200*	0.982	66	0.466
Zn	0.101	66	0.089	0.910	66	0.000

注：*表示该元素服从正态分布。

Note: * indicates that the element follows a normal distribution.

表5　高产区叶片矿质元素均值和概率分级法中适宜值比较

Table 5 Comparison between the mean values of mineral elements in the leaves in the high-yield area and the suitable value based on probability grading method

元素 Element	高产区平均值 Mean of high-yield region	概率分级法正常值范围 Suitable value in probability grading method
N/(g·kg^{-1})	18.45±1.36	17.90~19.67
P/(g·kg^{-1})	3.97±0.88	3.56~4.60
K/(g·kg^{-1})	5.30±0.52	5.22~6.13
Ca/(g·kg^{-1})	3.73±0.82	3.13~3.88
Mg/(g·kg^{-1})	2.12±0.46	1.90~2.27
Fe/(mg·kg^{-1})	139.73±47.73	109.19~158.85
Mn/(mg·kg^{-1})	278.66±60.75	262.05~311.14
Cu/(mg·kg^{-1})	5.76±1.09	5.44~6.42
Zn/(mg·kg^{-1})	21.23±5.38	17.33~24.87

对不符合正态分布的P、K、Fe和Zn 4种元素，如按概率分级法处理，会导致各级别之间样本比例出现较大的差异，使得4种元素的分布偏集中在某一区域，而其他区域不足，进而造成概率分级所确定的适宜值范围与高产区域中所呈现的正常值范围差异较大[22]。因此，对于这4种元素，我们通过高产区叶片矿质元素含量值进行矫正，使缺乏和过高区样品数分别占总样本的10%左右，低值和高值区样品数分别约占总样本的20%左右，适宜值区的样品数占总样本的40%左右。最终通过统计分析得出笃斯越橘叶片营养元素含量分级范围（表6）。

表6　笃斯越橘叶片矿质元素含量分级

Table 6 Classification of mineral elements in the leaves of *Vaccinium uliginosum* L.

元素 Element	缺乏 Deficiency	偏低 Lower	正常 Normal	偏高 Higher	过量 Excess
N/(g·kg^{-1})	<16.62	16.62~17.90	17.90~19.67	19.67~20.94	>20.94
P/(g·kg^{-1})	<3.05	3.05~3.56	3.56~4.60	4.60~5.12	>5.12
K/(g·kg^{-1})	<4.75	4.75~5.22	5.22~6.13	6.13~6.70	>6.70
Ca/(g·kg^{-1})	<2.58	2.58~3.13	3.13~3.88	3.88~4.43	>4.43
Mg/(g·kg^{-1})	<1.63	1.63~1.90	1.90~2.27	2.27~2.54	>2.54
Fe/(mg·kg^{-1})	<90.84	91.12~109.19	109.19~158.85	158.85~213.53	>213.53
Mn/(mg·kg^{-1})	<226.63	226.63~262.05	262.05~311.14	311.14~346.57	>346.57
Cu/(mg·kg^{-1})	<4.73	4.73~5.44	5.44~6.42	6.42~7.13	>7.13
Zn/(mg·kg^{-1})	<13.22	13.22~17.33	17.33~24.87	24.87~30.38	>30.38

2.5　笃斯越橘叶片矿质元素DOP指数诊断

DOP指数可指示植物中某矿质元素的丰缺指标，其值可为正数、负数或零。正值越大，表明植株体内该矿质元素含量越充盈，需求的强度越小，甚至可能过剩；负值越大，表明植株体内该矿质元素含量越匮缺，即需求强度越大；数值为零时，表明该矿质元素处于平衡状态。根据DOP指数值，由小到大排列，即为笃斯越橘的需肥顺序。NBI_m即营养不平衡指数，可以衡量植物体内养分的平衡状况，其值越大表明植株体内元素越不平衡，越小越平衡，等于零时为平衡态[11,21]，据此可评价笃斯越橘叶片中营养平衡水平。本研究以笃斯越橘各矿质元素含量适宜值的平均值为DOP诊断的基础值，适宜值是经过概率分级和高产区域法结合得出的，更能体现数据的代

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表性[22]。

表7为笃斯越橘叶片矿质元素DOP指数及需肥顺序，从营养不平衡指数NBI_m可知，高产区的笃斯越橘养分平衡状况优于中产区和低产区。由DOP诊断公式计算可知，高产区笃斯越橘叶片中N、Fe和Mn的含量偏低，P、K和Cu的含量缺乏，Mg的含量偏高，而Ca和Zn的含量过高，需肥顺序为P>K>Cu>Mn>Fe>N。中产区笃斯越橘叶片中P、Ca和Mg的含量偏低，Zn的含量缺乏，N、M和Cu含量偏高，而Fe的含量过高，需肥顺序为Zn>P>Ca>Mg。低产区笃斯越橘叶片中Mg含量处于平衡状态，N和Ca的含量偏低，Zn含量缺乏，K、Mn和Cu的的含量偏高，P和Fe的含量过高，需肥顺序为Zn>N>Ca。

表7 笃斯越橘叶片矿质元素DOP指数及需肥顺序

Table 7 DOP index of mineral elements and the order of fertilizer requirement in leaves of *Vaccinium uliginosum* L.

	DOP_N	DOP_P	DOP_K	DOP_{Ca}	DOP_{Mg}	DOP_{Fe}	DOP_{Mn}	DOP_{Cu}	DOP_{Zn}	NBI_m
高产区 High-yield region *n*=21	-1.02	-3.64	-3.19	3.49	0.95	-1.71	-1.77	-2.70	4.72	2.58
中产区 Middle-yield region *n*=33	1.66	-3.40	3.72	-2.31	-1.90	10.68	0.71	1.35	-6.27	3.56
低产区 Low-yield region *n*=12	-1.18	15.53	5.84	-1.15	0	12.11	6.79	1.52	-20.30	7.16

3 讨 论

3.1 大兴安岭地区笃斯越橘产量划分及叶片矿质元素含量特征

本研究在大尺度范围内通过多生境、多点取样分析，得出水湿地生境中笃斯越橘的产量最高，林下疏林生境中笃斯越橘的产量中等，林缘坡地生境的产量最低，这与徐海军等[18]的研究结论一致。在此基础上通过SPSS中的K均值聚类分析确定了高产群体区域共有21个，占据总样本的33.3%，而中低产区占据了66.7%。

矿质元素的丰缺状况与植物产量相关。果树叶片中矿质元素间存在着协同与拮抗作用的动态平衡，某种元素的吸收通常受其他元素的影响[23]。本研究证实，高产区叶片矿质元素间以协同作用为主，而中低产区矿质元素间协同与拮抗作用共存，表明营养元素间的正相互作用是决定高产的一个重要因素。各元素间仅Zn与产量呈显著正相关，而K与产量呈极显著正相关，证实了这两种元素对笃斯越橘产量的重要性，特别是K元素，这与郑永强等[13]于2018年在鲍威尔脐橙叶片营养诊断中得到的结论一致。本研究发现，笃斯越橘叶片中N素的空间变异程度最小，而Zn元素的空间变异程度最大。刘小勇等[22]和马海洋等[8]研究了苹果叶片矿质元素的空间变异，发现叶片中N素含量的空间变异均最低，而微量元素Zn的空间变异性较大，这与本研究的结果一致。Mn元素作为植物体内许多酶的活化剂，对叶绿素的合成和叶绿体结构的维持具有重要作用[24-25]。本研究表明，笃斯越橘叶片中Mn含量较高（161.67~375.07 mg·kg^{-1}），这对于其他果树可能会引起中毒[20]，但笃斯越橘却能够正常生长，说明笃斯越橘对Mn元素具有较强的耐性范围，这与前人研究结果一致[16-17]，其原因可能是研究区域土壤pH较低，有利于笃斯越橘叶片积累大量的Mn元素[16]。

3.2 大兴安岭地区笃斯越橘叶片矿质元素含量适宜值

白永超等[5]的研究表明，笃斯越橘叶片N、P、K、Cu及Zn元素含量显著影响果实矿质营养元素含量，可应用叶片矿质营养诊断法明确树体矿质元素丰缺，进而改善果实产量及品质。李亚东等[16]研究发现，长白山地区笃斯越橘叶片中各矿质元素含量的适宜范围为：N 18.00~25.00 g·kg^{-1}、P 2.40~4.00 g·kg^{-1}、K 5.50~7.50 g·kg^{-1}、Ca 2.40~4.00 g·kg^{-1}、Mg 1.20~1.60 g·kg^{-1}、Fe 100.00~150.00 mg·kg^{-1}，Mn 300.00~830.00 mg·kg^{-1}，Cu 5.00~8.00 mg·kg^{-1}。本研究表明，大兴安岭地区笃斯越橘叶片N、K、Ca、Mn和Cu等5种元素含量适宜值低于长白山地区。P、Mg和Fe元素含量的适宜值则略高于长白山地区。果树在生理上对矿质元素的需求是基本恒定的，而叶片中含量上的差异主要是由环境条件及养分供应水平等因素决定的[22,26]。长白山地区虽然与大兴安岭地区的生境条件相似，但纬度、土壤养分差异决定了两个地区笃斯越橘矿质元素含量适宜值的差异。马小川等[27]的研究表明，温州蜜柑叶片中钾和锰的含量表现为延纬度从北至南依次增加，可能由于南

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部较强的蒸腾作用加速了土壤溶液中溶质向根的运输，再者较高的气温影响酶的活性，加速树体对矿质元素的吸收[27-28]。

3.3　大兴安岭地区笃斯越橘叶片矿质营养诊断

DOP法是目前营养诊断的有效分析方法之一，该法结果不仅阐明营养元素限制的顺序，亦可对元素含量偏差直接测量，有助于随后计算施肥方案的肥料需求[11]，且不会造成当几种元素同时过量时而造成的诊断误差。据此本研究应用DOP法对笃斯越橘进行叶片营养诊断。本研究测定了笃斯越橘叶片N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu和Zn等9种矿质元素含量，其中P、K、Fe和Zn 4种元素未通过正态性检验，不服从正态分布，不符合DOP诊断的要求。据此本研究应用概率分级法及高产区域法相结合得出矿质元素含量适宜值，应用该适宜值的平均值作为DOP诊断的基础值，克服了不服从正态分布的元素应用DOP诊断的弊端[22]。

果树矿质营养的最适状态，一方面由叶片诸矿质元素的含量决定，另一方面取决于矿质元素间的平衡，其产量及品质的提升取决于矿质元素的适宜值，但当一种矿质元素含量提高，其他元素含量也随之提高时，可达到另一水平的新平衡，从而达到丰产目标[29]。DOP指数可确定达到该这种平衡的首要矿质元素，这能作为指导施肥的重要依据。DOP指数的绝对值是矿质营养平衡的综合反映，其值越大，各元素之间越不平衡。各元素$|DOP_X|$之和的平均值称为营养不平衡指数（以NBI_m表示），NBI_m越接近于零，植株体内矿质元素越平衡，越大越不平衡[11,19]。本研究中高产区域的NBI_m的平均值为2.58，小于中产区域的NBI_m的平均值（3.56）和低产区域的NBI_m的平均值（7.16），表明笃斯越橘高产区域树体内的矿质元素较中、低产区域平衡。另外分析表明，高产区域的叶片中存在养分缺乏状况，而中、低产区域存在养分过量状况。说明在养分较低的情况下，笃斯越橘可保持了较高的产量，这与Warman等[30]的研究结论相一致。

4　结　论

（1）大兴安岭地区水湿地生境中生长的笃斯越橘的产量最高、林下疏林生境中的产量中等，而林缘坡地生境中的产量最低。

（2）应用概率分级法及高产区域法相结合得出大兴安岭地区笃斯越橘叶片中N素含量的适宜值为17.70~19.49 $g \cdot kg^{-1}$，P素含量的适宜值为3.44~4.54 $g \cdot kg^{-1}$，K素含量的适宜值为5.26~6.04 $g \cdot kg^{-1}$，Ca素含量的适宜值为3.16~4.03 $g \cdot kg^{-1}$，Mg素含量的适宜值为1.92~2.30 $g \cdot kg^{-1}$，Fe素含量的适宜值为113.15~155.53 $mg \cdot kg^{-1}$，Mn素含量的适宜值为257.47~307.27 $mg \cdot kg^{-1}$，Cu素含量的适宜值为5.39~6.37 $mg \cdot kg^{-1}$，Zn素含量的适宜值为17.33~24.22 $mg \cdot kg^{-1}$。

（3）大兴安岭地区高产区域的笃斯越橘养分平衡状况优于中低产区域。根据诊断结果，建议在人工抚育过程中，高产区可适量施用N、P、K、Fe、Mn和Cu肥，中产区可施用P、Ca、Mg和Zn肥，低产区可施用N、Ca和Zn，各区均具有一定的产量提升空间。

参考文献 References：

[1] 郝瑞 . 长白山笃斯越桔的调查研究[J]. 园艺学报，1979，6(2): 87-93.
HAO Rui. Investigation on the Du-Si Blueberry in the Changbai-shan mountain regions[J]. Acta Horticultura Esinica，1979，6 (2): 87-93.

[2] SU S，WANG L J，FENG C Y，LIU Y，LI C H，DU H，TANG Z Q，XU Y J，WANG L S. Fingerprints of anthocyanins and flavonols of *Vaccinium uliginosum* berries from different geographical origins in the Greater Khingan Mountains and their antioxidant capacities[J]. Food Control，2016，64: 218-225.

[3] ZAFRA-STONE S，YASMIN T，BAGCHI M，CHATTERJEE A，VINSON J A，BAGCHI D . Berry anthocyanins as novel antioxidants in human health and dis ease prevention[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2007，51 (6): 675-683.

[4] SANTOS R O，TRINDADE S C，MAURER L H，BERSCH A M，SAUTTER C K，PENNA N G. Physicochemical，Antioxidant and sensory quality of brazilian blueberry wine[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciencias，2016，8 (3): 1557.

[5] 白永超，卫旭芳，陈露，万如萌，侯智霞 . 笃斯越橘果实、叶片矿质元素和土壤肥力因子与果实品质的多元分析[J]. 中国农业科学，2018，51(1): 170-181.
BAI Yongchao，WEI Xufang，CHEN Lu，WAN Rumeng，HOU Zhixia. Multivariate analysis of fruit leaf mineral elements，soil fertility factors and fruit quality of *Vaccinium uliginosum* L[J]. Scientia Agricultura Sinica，2018，51(1):170-181.

[6] HANSON E，HANCOCK J F. Managing the nutrition of highbush blueberries[J]. Michigan State University，Extension Bulletin，1996，E-2011: 10-12.

[7] HART J，STRIK B，WHITE L，YANG W，HART J. Nutrient management for blueberries in Oregon[J]. Oregon State University Extension Service. Publication，2006，EM8918 :14.

[8] 马海洋，同延安，路永莉，高义民，陈黎岭，王少杰 . 诊断施肥综合法(DRIS)在渭北旱塬红富士苹果营养诊断中的应用[J]. 干旱地区农业研究，2013，31(2): 84-88.
MA Haiyang，TONG Yanan，LU Yongli，GAO Yimin，CHEN Liling，WANG Shaojie. Application of DRIS in foliar nutrition diagnosis of Fuji apple trees in Weibei dryland of Shaanxi province

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2013，31(2): 84-88.

[9] BEAUFILS E R. Diagnosis and recommendation integrate system (DRIS) [J]. Soil Science Bulletin，1973，1: 120-132 .

[10] PARENT L E，KARAM A，VISSER S A. Compositional nutrient diagnosis of the greenhouse tomato[J]. HortScience，1993，28 (10): 1041-1042.

[11] MONTANES L，HERAS L，ABADIA J，SANZ M. Plant analysis interpretation based on a new index: Deviation from optimum percentage (DOP) [J]. Journal of Plant Nutrition，1993，16 (7): 1289-1308.

[12] GOUDDARZI K A. Evaluation of nutritional balance for grape orchards of sisakht region in kohgiluyeh-va-boyerahmad province by deviation from optimum percentage method[J]. Iranian Journal of Soil and Waters Sciences，2005，19(1): 26-34.

[13] 郑永强，王娅，杨琼，贾学梅，何绍兰，邓烈，谢让金，易时来，吕强，马岩岩 . 重庆三峡库区鲍威尔脐橙花期叶片矿质营养诊断[J]. 中国农业科学，2018，51(12): 2378-2390.
ZHENG Yongqiang，WANG Ya，YANG Qiong，JIA Xuemei，HE Shaolan，DENG Lie，XIE Rangjin，YI Shilai，LÜ Qiang，MA Yanyan. Leaf nutritional diagnosis of powell navel orange at flowering stage in Chongqing Three Gorges Reservoir Area[J]. Scientia Agricultura Sinica，2018，51(12): 2378-2390.

[14] STARAST M，KARP K，VOOL E，PAAL T，ALBERT T. Effect of NPK fertilization and elemental sulfur on growth and yield of lowbush blueberry[J]. Agricultural and Food Science，2007，16: 34-45.

[15] BRYLA D R，STRIK B C. Nutrient requirements，leaf tissue standards，and new options for fertigation of northern highbush blueberry[J]. Horttechnology，2015，25(4): 464-470.

[16] 李亚东，郝瑞，曲路平，张志东 . 笃斯越桔矿质营养特性研究[J]. 吉林农业大学学报，1990，12(1): 24-28.
LI Yadong，HAO Rui，QU Luping，ZHANG Zhidong. A study of the mineral nutrient status of bog bilberry[J]. Journal of Jilin Agricultural University，1990，12(1): 24-28.

[17] 白永超，侯智霞，王冲，杨俊枫，杨乐 . 大兴安岭笃斯越橘叶片、根系及根系层土壤养分特性研究[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2017，45(7): 115-124.
BAI Yongchao，HOU Zhixia，WANG Chong，YANG Junfeng，YANG Le. Nutritional characteristics in leaf，Root and root soil of Vaccinium uliginosumin the Greater Xing'an Mountains[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)，2017，45(7): 115-124.

[18] 徐海军，沈光，周琳，张悦 . 笃斯越橘生境分类及生态因子分析[J]. 东北林业大学学报，2013，41(1): 59-62.
XU Haijun，SHEN Guang，ZHOU Lin，ZHANG Yue. Habitat classification and ecological factors analysis of Vaccinium uliginosum[J]. Journal of Northeast Forestry University，2013，41(1): 59-62.

[19] 鲍士旦 . 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社，2000.
BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press，2000.

[20] 唐玉琴，彭良志，淳长品，凌丽俐，方贻文，严翔 . 红壤甜橙园土壤和叶片营养元素相关性分析[J]. 园艺学报，2013，40(4): 623-632.
TANG Yuqin，PENG Liangzhi，CHUN Changpin，LING Lili，FANG Yiwen，YAN Xiang. Correlation analysis on nutrient element contents in orchard soils and Sweet Orange Leaves in southern Jiangxi Province of China[J]. Acta Horticulturae Sinica，2013，40(4): 623-632.

[21] 徐叶挺，张雯，杨波，杨磊，龚鹏，张平 . 新疆莎车'纸皮'扁桃叶片营养诊断体系的建立与应用[J]. 果树学报，2014，31(1): 143-149.
XU Yeting，ZHANG Wen，YANG Bo，YANG Lei，GONG Peng，ZHANG Ping. Establishment and application of nutrient diagnosis system of 'Zhipi' almond leaf mineral elements in Shache County，Xinjiang[J]. Journal of Fruit Science，2014，31(1): 143-149.

[22] 刘小勇，董铁，王发林，张坤，张辉元，马明 . 甘肃省元帅系苹果叶营养元素含量标准值研究[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(1): 246-251.
LIU Xiaoyong，DONG Tie，WANG Falin，ZHANG Kun，ZHANG Huiyuan，MA Ming. Studies on the standard ranges of leaf nutritional element contents of Delicious apple in Gansu province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2013，19(1) : 246-251.

[23] ADAMEC L. Leaf absorption of mineral nutrients in carnivorous plants stimulates root nutrient uptake[J]. New Phytologist，2002，155(1): 89-100.

[24] 朱磊，韩苹，张鹤，孙守如，李严曼 . 芥菜锰超氧化物歧化酶基因 *BjMnSOD1* 的克隆和分析[J]. 植物生理学报，2017，53 (4): 625-631.
ZHU Lei，HAN Ping，ZHANG He，SUN Shouru，LI Yanman. Cloning and analysis of superoxide dismutase gene *BjMnSOD1* from *Brassica juncea*[J]. Plant Physiology Journal，2017，53 (4): 625-631.

[25] 陈军，高贵珍，赵亮，徐礼生，张兴桃，马帅 . 金属离子对天冬氨酸酶基因工程菌催化合成 L-天冬氨酸影响的研究[J]. 基因组学与应用生物学，2018，37(8): 3422-3425.
CHEN Jun，GAO Guizhen，ZHAO Liang，XU Lisheng，ZHANG Xingtao，MA Shuai. Effect of metal ions on the catalytic synthesis of L-Aspartic acid by aspartase genetic engineering bacteria [J]. Genomics and Applied Biology，2018，37(8): 3422-3425.

[26] 魏钦平，程述汉，唐芳，李嘉瑞，张德林 . 红富士苹果品质与生态气象因子关系的研究[J]. 应用生态学报，1999，10(3): 289-292.
WEI Qinping，CHENG Shuhan，TANG Fang，LI Jiarui，ZHANG Delin. Relationship between fruit quality of Fuji apple and meteorological factors[J]. Chinese Journal of Applied，1999，10(3): 289-292.

[27] 马小川，卢晓鹏，张子木，熊江，潘斌，刘恋，李泽航，唐超兰，谢深喜 . 湖南省不同纬度温州蜜柑园土壤和叶片营养及果实品质分析[J]. 果树学报，2018，35(4): 423-432.
MA Xiaochuan，LU Xiaopeng，ZHANG Zimu，XIONG Jiang，PAN Bin，LIU Lian，LI Zehang，TANG Chaolan，XIE Shenxi. Analyses of the soil and tree nutrition and fruit quality of Satsuma mandarin in orchards at different latitudes in Hunan province [J]. Journal of Fruit Science，2018，35(4): 423-432.

[28] 肖浪涛，王三根 . 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社，2008.
XIAO Langtao，WANG Sangen. Plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press，2008.

[29] DRIS R，NISKANEN R，FALLACHI E. Relationships between leaf and fruit minerals and fruit quality attributes of apples grown under northern conditions[J]. Journal of Plant Nutrition，1999，22(12):1839-1851.

[30] WARMAN P R，BURNHAM J C，EATON L J. Effects of repeated applications of municipal solid waste compost and fertilizers to three lowbush blueberry fields[J]. Scientia Horticulturae，2009，122: 393-398.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net