

# 油茶微量元素铜铁锌吸收和积累特征

曹永庆, 姚小华\*, 王开良, 任华东

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

**摘要:** 为弄清油茶(*Camellia oleifera*)对微量元素铜、铁、锌的吸收利用特征, 对5年生‘长林4号’各器官的铜、铁、锌元素含量及其年变化进行了研究。结果表明, 油茶植株中铁元素的含量最高, 其次为锌和铜元素; 单株油茶对锌、铜元素的年积累量分别为62.97 mg和22.60 mg, 约为3:1。从果实发育期至成熟期, 锌元素的单株吸收积累量为40.18 mg, 约占年吸收积累量的63.81%, 从抽梢期至果实成熟期, 铜元素的单株吸收积累量为20.04 mg, 占年吸收积累量的88.67%, 从休眠期至抽梢期, 油茶地上部分生长所需的铜、锌元素分别有30.25%和57.90%来源于根系贮存的营养; 油茶对铁元素的吸收积累则集中在抽梢期至果实发育期, 单株吸收量达0.34 g。这些为指导油茶科学施肥提供了理论依据。

**关键词:** 油茶; 铜; 铁; 锌; 积累量

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.03.009

## Changes in Absorption and Accumulation of Copper, Zinc, Iron in *Camellia oleifera*

CAO Yong-qing, YAO Xiao-hua\*, WANG Kai-liang, REN Hua-dong

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to clarify the absorption and accumulation characteristics of copper, zinc and iron microelements in *Camellia oleifera*, their contents and annual changes in *C. oleifera* ‘Changlin 4’ at five-year-old were studied. The results showed that the content of iron in *Camellia oleifera* was the highest, following by zinc and copper. The annual absorption of zinc and copper per individual reached 62.97 mg and 22.60 mg, respectively, with the ratio of 3 : 1. The absorption of zinc per individual reached 40.18 mg from fruit development to ripening stage, accounting for 63.81% of annual uptake. The absorption of copper per individual reached 20.04 mg from shooting to fruit ripening stage, accounting for 88.67% of annual uptake. The copper and zinc stored in roots supplied 30.25% and 57.90% of the need for tree growth from dormancy to shooting stage. The absorption period of iron focused on the shooting to fruit development stage, about 0.34 g per tree. These could provide theory basis for scientific fertilization of *Camellia oleifera*.

**Key words:** *Camellia oleifera*; Copper; Zinc; Iron; Accumulation

油茶(*Camellia oleifera*)为山茶科(Theaceae)山茶属植物, 是我国南方重要的木本食用油料树种<sup>[1]</sup>, 其种仁脂肪酸含量可达40%以上, 其中不饱和脂肪

酸含量达90%以上<sup>[2]</sup>, 具有较高的营养价值和降血压血脂、软化血管等医疗保健作用<sup>[3-4]</sup>, 目前我国的种植面积超过 $4.0 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 具有巨大的发展潜

收稿日期: 2015-08-26 接受日期: 2015-11-06

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目(2014SY03); 浙江省农业新品种选育重大科技专项项目(2012C12908-16)资助

This work was supported by the Forestry Science and Technology Cooperation Project for Zhejiang-Chinese Academy of Forestry (Grant No. 2014SY03), and the Zhejiang Key Science and Technology Project for Agricultural Breeding (2012C12908-16).

作者简介: 曹永庆(1981~), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事经济林栽培研究。E-mail: caoyq1981@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yaoxh168@163.com

力。然而,我国油茶分布区大多立地条件差,土壤瘠薄<sup>[5]</sup>,尤其是近年来营养元素缺乏或施肥不合理造成树木生长不良等状况愈发突出,因此,科学平衡施肥仍然是影响油茶林地高产高效经营的重要因素。

目前对油茶矿质营养利用的基础理论研究,多集中在大量元素氮、磷、钾和中量元素钙、镁、硫的吸收利用规律方面<sup>[6-7]</sup>,而关于油茶对微量元素营养吸收利用的研究较少,且多以生产性试验研究为主<sup>[8-9]</sup>。微量元素铜、锌、铁是植物生长发育必需的营养元素,是多种酶的组分和活化剂,在酶活、叶绿素合成、维持生物膜结构和功能等方面具有重要的作用<sup>[10-11]</sup>。微量元素缺乏会严重影响植物的生长发育<sup>[12]</sup>,铜、铁元素过剩又会对植物形成毒害作用,并且影响对其他矿质元素的吸收<sup>[13-15]</sup>。弄清油茶树木对微量元素的吸收和利用规律对于科学指导油茶微肥的施用,具有重要的意义。

鉴于此,本试验以普通油茶(*Camellia oleifera*)为试材,主要研究了油茶年发育周期对微量元素铜、锌、铁的吸收和积累规律,为指导油茶科学施肥,促进油茶生长、提高产量和品质提供理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区自然概况

试验材料油茶(*Camellia oleifera*)来自浙江金华东方红林场国家油茶油桐种质基地,海拔高度80 m,年均降水量1408.4 mm,属亚热带季风气候,林地土壤以红壤为主,土层较深厚。

### 1.2 供试材料和样品采集

选取5年生‘长林4号’油茶为试验材料,田间正常管理,株行距2 m×3 m,从定植第3年开始每年9月份施1次复合肥(N-P-K=15-15-15),施肥量为每株0.5 kg;选取长势健壮一致的油茶树,分别于休眠期(1月15日)、抽梢期(4月15日)、果实发育期(7月15日)、成熟期(10月15日)取样;重复3次。

### 1.3 方法

采用树体挖掘、分解取样的方法,即树体整体挖出后,按果实、叶片、新梢、枝干、根系进行解析和破碎,样品经100℃~105℃杀酶15 min,然后

在70℃~80℃下烘至恒重,称量干重。采用原子吸收分光光度法分别测定果实、叶片、新梢、枝干和根系中铜、锌、铁元素含量<sup>[16]</sup>,由国家林业局经济林产品质量检验检测中心(杭州)完成。

各器官矿质元素积累量=矿质元素含量(g kg<sup>-1</sup>)×器官干重,以果实、叶片、新梢和枝干矿质元素积累量的总和计算地上部分矿质元素积累量,地上部分矿质元素积累量与根系矿质元素积累量的总和计算整株矿质元素积累量,以不同取样期整株矿质元素积累量的差值计算不同发育时期矿质元素的吸收量。

试验数据采用Excel软件进行统计分析并作图。

## 2 结果和分析

### 2.1 铜锌铁元素含量及积累量的变化

研究结果表明,油茶中铁元素含量最高,其次是锌和铜元素;新生器官如新梢和嫩叶中的铜、锌元素含量较高,铁元素含量较低;在年发育周期内,各组织器官中铜、铁、锌元素的积累量表现出不同的变化趋势。

**叶片中的变化** 由表1可见,与成熟叶片相比,油茶嫩叶中的铜、锌元素含量较高,分别达到9.12 mg kg<sup>-1</sup>和24.32 mg kg<sup>-1</sup>。年发育周期中,成熟叶片的铜元素含量表现出上升趋势,果实成熟期叶片的铜含量相对最高,为4.98 mg kg<sup>-1</sup>,积累量达9.75 mg。锌元素含量的年变化不大,但随着叶片生物量的增加,积累量增加,果实成熟期叶片锌元素的积累量达23.53 mg(表2)。从休眠期至果实成熟期,叶片的铁元素含量表现出下降趋势,抽梢期叶片的铁元素积累量最低,为0.14 g(表2)。

**枝干中的变化** 年发育周期中,油茶枝干的铜元素含量和积累量均表现出先下降后上升的趋势,抽梢期的铜元素含量和积累量最低,分别为2.14 mg kg<sup>-1</sup>和2.03 mg,果实成熟期枝干的铜元素含量和积累量较高,分别为3.69 mg kg<sup>-1</sup>和10.98 mg。休眠期后枝干中的锌和铁元素含量表现出下降趋势,抽梢期枝干的锌铁元素积累量分别为16.73 mg和0.20 g,显著低于休眠期(表1,2),然而,从果实发育期至成熟期,枝干的锌和铁元素含量无明显变化。可见,作为贮存矿质元素的重要器官,枝干中的铜铁锌元素在抽梢期可能发生了外运。

**根系中的变化** 与枝干类似,根系中的铜锌

铁元素含量和积累量在年发育期中表现出先下降后上升的趋势,抽梢期根系铜铁锌元素的含量分别为  $3.96 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $12.01 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $0.35 \text{ g kg}^{-1}$ , 积累量分别为  $2.39 \text{ mg}$ 、 $7.02 \text{ mg}$  和  $0.21 \text{ mg}$ , 均为最低, 这也说明, 抽梢期根系的铜铁锌元素向地上部分发生了转运, 以满足新生器官的生长需求。

**新梢中的变化** 休眠期测定的新梢为上一年度的秋梢, 而抽梢期(4月)测定的新梢为当年生春梢, 从表 1 可以看出, 铜、锌和铁元素在春梢的含量要低于秋梢, 可见春梢发育需要的铜铁锌元素相对较低。但随着新梢的生长发育, 其铜铁锌元素的积累量显著增加(表 2)。

**树皮中的变化** 如表 1 所示, 树皮中铜和锌

元素含量变化规律类似, 从休眠期到抽梢期无显著变化, 从抽梢期至果实发育期含量显著升高, 分别由  $4.76 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $26.21 \text{ mg kg}^{-1}$  增至  $5.32 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $29.59 \text{ mg kg}^{-1}$ , 从果实发育期至果实成熟期含量无显著变化。而树皮中铁元素含量表现出先升高后下降的趋势, 抽梢期铁元素含量达最高(表 2), 为  $0.3 \text{ g kg}^{-1}$ 。

**果实中的变化** 与茶籽相比, 茶壳中铜铁锌元素含量较低, 抽梢期幼果的铜铁锌元素含量最高, 分别为  $7.68 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $17.20 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $0.20 \text{ g kg}^{-1}$  (表 1), 随着果实生长发育, 其含量呈下降趋势; 此外, 随着果实的生长发育, 铜铁锌元素积累量迅速增加(表 2)。

表 1 油茶铜铁锌元素含量的变化

Table 1 Changes in copper, zinc, iron contents in *Camellia oleifera*

元素 Element	发育时期 Development stage	叶片 Leaf		枝干 Stem	根 Root	新梢 Shoot	树皮 Bark	果实 Fruit	
		老叶 Old	嫩叶 Young					茶壳 Peel	茶籽 Seed
Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	休眠期 Dormancy		3.36	3.61a	5.77bc	10.36	4.42c	—	
	抽梢期 Shooting	3.47	9.12	2.14b	3.96d	8.41A	4.76bc	7.68	
	果实发育期 Fruit development		4.10	3.32a	7.98a	—	5.32a	3.54	
	成熟期 Ripening		4.98	3.69a	7.85a	—	5.19a	3.29	6.51
Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	休眠期 Dormancy		11.71	21.48a	22.64a	43.48	22.42c	—	
	抽梢期 Shooting	16.70	24.32	18.17b	12.01b	27.61B	26.21bc	17.20	
	果实发育期 Fruit development		10.67	18.20b	23.64a	—	29.59a	4.35	
	成熟期 Ripening		11.95	18.08b	23.37a	—	29.02a	8.44	9.21
Fe ( $\text{g kg}^{-1}$ )	休眠期 Dormancy		0.19	0.48a	0.47a	0.29	0.15b	—	
	抽梢期 Shooting	0.15	0.085	0.21b	0.35bc	0.18C	0.30a	0.20	
	果实发育期 Fruit development		0.13	0.15c	0.40a	—	0.12bc	0.11	
	成熟期 Ripening		0.083	0.12c	0.31c	—	0.093c	0.087	0.12

同列数据后不同小写和大写英文字母分别表示差异显著( $P < 0.05$ )和极显著( $P < 0.05$ )。下同。

Data followed different small and Capital letters within column indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels by multiple comparison, respectively.

The same is following Tables.

表 2 油茶铜铁锌元素积累量的变化

Table 2 Changes in copper, zinc, iron accumulation in *Camellia oleifera*

元素 Element	发育时期 Development stage	叶片 Leaf	枝干 Stem	根 Root	新梢 Shoot	果实 Fruit
Cu (mg)	休眠期 Dormancy	2.56cd	3.75c	3.50c	0.14	—
	抽梢期 Shooting	6.28b	2.03d	2.39d	1.75A	0.069c
	果实发育期 Fruit development	6.94b	7.29b	7.26b	—	0.39b
	成熟期 Ripening	9.75a	10.98a	9.04a	—	3.54a
Zn (mg)	休眠期 Dormancy	9.28d	22.34c	13.85c	0.61	—
	抽梢期 Shooting	21.41a	16.73d	7.02d	5.70B	0.15c
	果实发育期 Fruit development	18.20bc	28.89b	21.30b	—	0.48b
	成熟期 Ripening	23.53a	53.79a	26.96a	—	4.77a
Fe (g)	休眠期 Dormancy	0.17a	0.47a	0.28bc	0.0041	—
	抽梢期 Shooting	0.14b	0.20c	0.21d	0.037C	0.0013c
	果实发育期 Fruit development	0.22a	0.33b	0.36a	—	0.013b
	成熟期 Ripening	0.17a	0.37b	0.37a	—	0.050a

## 2.2 铜锌铁元素积累量的年变化

**铜元素积累量** 如图 1: A 所示, 油茶年发育周期内, 单株铜元素积累量表现出显著增加趋势。从休眠期至抽梢期, 铜元素积累量从 9.96 mg 上升至 12.52 mg, 表明此时每株油茶从土壤中吸收了 2.56 mg 铜元素, 而根系中的铜元素从 3.50 mg 下降至 3.29 mg, 下降了 1.11 mg, 由此可见, 休眠期至抽梢期, 油茶植株通过根系从土壤吸收的铜元素全部积累到地上部分器官, 同时根系中贮存的铜元素也向地上部分转运, 以促进地上部分新生器官的生长。抽梢期至果实发育期, 每株油茶铜元素的积累量增加了 9.36 mg, 其中根系的铜元素积累量增加了 4.87 mg, 可见, 此时是植株吸收铜元素的活跃期, 植株从土壤中吸收的铜元素有 52.03% 积累到根系中, 47.97% 积累到地上部分组织器官中。从果实发育期至果实成熟期, 每株油茶的铜元素积累量提高了 10.67 mg, 而根系的铜元素积累量变化不明显, 表明植株吸收的铜元素几乎全部运输至地上部分。

**锌元素积累量** 如图 1: B 所示, 从休眠期至抽梢期, 单株锌积累量从 46.08 mg 提高到 51.00 mg, 增加了 4.92 mg, 然而, 根系的锌积累量下降了 6.78 mg, 可见, 植株地上部分生长所需锌元素的 57.90% 由根系中贮藏的锌元素供应。从抽梢期到果实发育期, 单株的锌元素积累量表现出上升趋势, 增加了 17.87 mg, 其中根系增加了 14.27 mg, 说明油茶植株从土壤吸收锌元素的 79.85% 积累到根系中, 仅 20.15% 运输至地上部分。从果实发育期至果实成熟期, 单株锌积累量增加了 40.18 mg, 而根系的锌元素积累量升高了 5.68 mg, 可见, 此阶段植株吸收锌元素的 85.86% 转运至地上部分。

**铁元素积累量** 如图 1: C 所示, 从休眠期至抽梢期, 单株油茶的铁元素积累量从 0.93 g 下降至 0.58 g, 下降了 0.35 g, 其中根系下降了 0.08 g, 这表明根系中贮存的铁元素向地上部分组织器官发生了转运。整株铁元素积累量的下降可能与冬季落叶引起叶片的铁元素积累量下降有关。从抽梢期至果实发育期, 单株油茶的铁元素积累量从 0.58 g 提高到 0.92 g, 增加了 0.34 g, 其中根系中铁元素积累量增加了 0.15 g, 表明根系从土壤中吸收铁元素的 44.12% 积累到根系中, 55.88% 积累到地上部分。从果实发育期至果实成熟期, 整株的铁元素积累量无明显变化, 表明植株未从土壤中吸收铁元素, 果实的成熟和植株生长仅依靠植株体内贮存的铁元素。

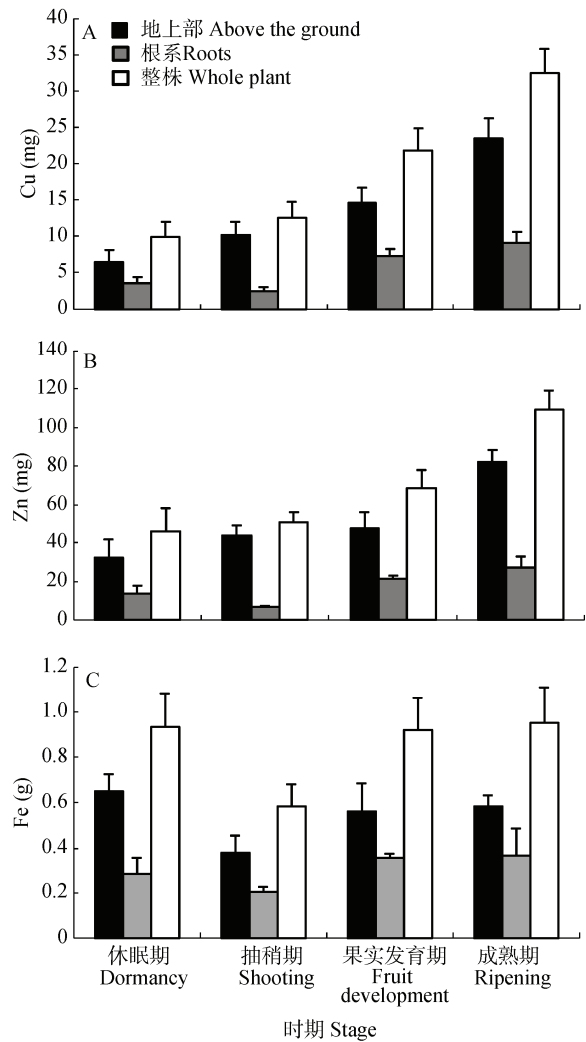


图 1 单株油茶铜锌铁元素积累量的年周期变化

Fig. 1 Annual changes in individual accumulation of copper, zinc, iron in *Camellia oleifera*

## 2.3 对铜、锌、铁元素吸收量的年变化

根据不同发育时期油茶铜、铁、锌元素积累量的变化, 探明了 1 年不同时间段矿质元素的吸收量 (图 2), 油茶对锌的积累量最大, 其次是铜元素, 而铁元素积累量则表现出先下降后升高的趋势。5 年生油茶对铁元素的年积累量无明显增加, 可能与休眠期落叶带走大量铁元素有关。从 1 月 15 日 (休眠期) 至 4 月 15 日 (抽梢期), 单株油茶对铜和锌吸收量分别为 2.56 mg 和 4.92 mg, 从抽梢期至果实发育期 (7 月 15 日) 吸收量分别为 9.36 mg 和 17.87 mg, 吸收比例均约为 1:2, 而此时油茶对铁元素的吸收量为 0.34 g, 远高于该段时期内树体对铜、锌元素的吸收量; 从果实发育期至果实成熟期 (10 月 15 日) 单株油茶对铜和锌元素吸收量分别为 10.68 mg 和

40.18 mg, 约为 1 : 4, 对铁的吸收量则无明显变化。

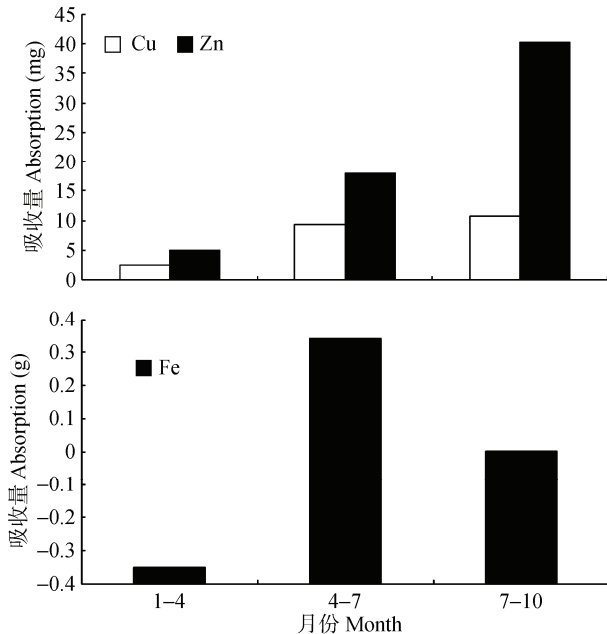


图 2 单株油茶对铜、锌、铁元素吸收量的年变化

Fig. 2 Annual changes in individual absorption of copper, zinc, iron in *Camellia oleifera*

### 3 讨论和结论

总体看来, 油茶树中的铁元素含量最高, 其次是锌和铜元素, 这与苹果(*Malus pumila*)<sup>[17]</sup>中铜锌铁元素含量特征一致, 在年发育周期中, 单株油茶对锌元素的吸收量达 62.97 mg, 对铜元素的吸收量为 22.6 mg, 约为 3 : 1, 其中 1 月份(休眠期)至 7 月份(果实发育期)的吸收量约为 1 : 2, 7 月份至果实成熟期约为 1 : 4 (图 2)。油茶对铜铁锌元素的积累规律也不同, 如对锌元素的积累集中在 7-10 月, 单株积累量达 40.18 mg, 约占年积累量的 63.81%, 而对铜积累量的年变化较小, 其中从抽梢期(4 月 15 日)至果实成熟期(10 月 15 日)的单株总积累量为 20.04 mg, 占年积累量的 88.67%。这与油茶对磷元素的吸收规律类似, 从 4 月至 10 月, 油茶对磷元素的吸收量超过了年吸收量的 90%, 其中 7 月至 10 月, 对磷元素的吸收量超过了年吸收量的 50%<sup>[6]</sup>。4-7 月则是油茶吸收铁元素的活跃时期, 这与油茶对钾<sup>[6]</sup>、钙<sup>[7]</sup>、锰<sup>[9]</sup>元素的吸收规律类似。可见, 针对油茶微量元素缺乏症状, 在 4 月至 7 月应加强施用铁肥, 7 月至 10 月加强锌肥的施用, 而铜元素施用则宜在 4 月至 10 月, 从而改善树体营养状况。

由图 1 可见, 从休眠期至抽梢期, 植株地上部分生长所需的微量元素一部分来源于根系贮存的营养, 此时地上部分所需铜锌元素中分别有 30.25% 和 57.90% 由根系自身贮存营养供应, 这与油茶对大量矿质元素磷和钾的利用特点类似<sup>[6]</sup>, 而与对中量元素钙、镁、硫的利用特点不同<sup>[7]</sup>。对果树的研究也表明, 早春根系的贮存营养应用于新生器官的生长<sup>[18-19]</sup>。同时, 叶片和春梢中铜、锌元素含量和积累量增加, 而枝干则表现出显著降低趋势(表 1, 2), 这表明枝干中的铜、锌元素发生了外运, 转移至叶片和新梢中, 参与新生器官的生长。对油茶中微量元素钙、镁、硫的利用研究表明<sup>[7]</sup>, 从休眠期至抽梢期, 枝干中的钙、镁、硫元素也向叶片和新梢中发生了转运。此外, 枝干中铁元素的含量和积累量也同样表现出下降趋势, 可见, 枝干中的铁元素也发生了外运, 然而, 叶片中铁元素的含量和积累量却显著降低, 这可能与铁元素的移动性较差, 休眠期树体落叶带走了大量铁元素有关<sup>[12]</sup>。

树体矿质营养状况与树龄、营养状况、立地条件等因素密切相关<sup>[18]</sup>, 本试验采用生产上广泛栽培的‘长林 4 号’普通油茶为材料, 初步探明了其对微量元素铜、锌、铁的吸收和积累利用规律, 对生产中油茶微肥的使用具有重要的指导和借鉴意义, 然而其他栽培品种及林分的矿质营养利用特征如何, 仍需要进一步研究探讨。

### 参考文献

- [1] ZHUANG R L. Chinese Oil-seed *Camellia* [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008: 1-19.  
庄瑞林. 中国油茶 [M]. 第 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2008: 1-19.
- [2] MA J L, YE H, RUI Y K, et al. Fatty acid composition of *Camellia oleifera* oil [J]. J Verbr Lebensm, 2011, 6(1): 9-12. doi: 10.1007/s00003-010-0581-3.
- [3] LI Y F, HU L, WANG L H. Current status and prospect of researches and utilizations on *Camellia oleifera* resources [J]. Guangxi Agri Sci, 2009, 40(4): 450-454.  
李远发, 胡灵, 王凌晖. 油茶资源研究利用现状及其展望 [J]. 广西农业科学, 2009, 40(4): 450-454.
- [4] WANG W J, CHEN C G, CHENG J. The positive role of camellia oil in medicine and health [J]. Food Nutr China, 2007(9): 48-51. doi: 10.3969/j.issn.1006-9577.2007.09.016.  
王文杰, 陈长庚, 程剑. 茶油在医药保健方面的积极作用 [J]. 中国食物与营养, 2007(9): 48-51. doi: 10.3969/j.issn.1006-9577.2007.09.016.

- [5] HE F, MAO X C, WANG Y Q, et al. Soil type classification for oil-tea *Camellia* plantations [J]. *Nonwood For Res*, 1993, 11(2): 1–14.  
何方, 毛献策, 王义强, 等. 中国油茶林地土壤类型的研究 [J]. *经济林研究*, 1993, 11(2): 1–14.
- [6] CAO Y Q, REN H D, LIN P, et al. Research on annual changes of nitrogen, phosphorous, potassium absorption and accumulation in oil-tea *Camellia* tree [J]. *For Res*, 2012, 25(4): 442–448. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2012.04.006.  
曹永庆, 任华东, 林萍, 等. 油茶树体对氮磷钾元素年吸收和积累规律的研究 [J]. *林业科学研究*, 2012, 25(4): 442–448. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2012.04.006.
- [7] CAO Y Q, WANG K L, REN H D, et al. Research on annual changes of calcium, magnesium, sulfur absorption and accumulation in oil-tea *Camellia* tree [J]. *J CS Univ For Techn*, 2012, 32(10): 58–62.  
曹永庆, 王开良, 任华东, 等. 油茶树体对钙镁硫元素年吸收和积累规律研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(10): 58–62.
- [8] HUANG T. Study on the rational fertilization application to *Camellia oleifera* Abel [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012: 4–16.  
黄涛. 油茶配方施肥技术研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2012: 4–16.
- [9] CAO Y Q, REN H D, WANG K L, et al. Annual changes of Mn content and accumulation in *Camellia oleifera* tree [J]. *Nonwood For Res*, 2012, 30(1): 19–22. doi: 10.3969/j.issn.1003-8981.2012.01.004.  
曹永庆, 任华东, 王开良, 等. 油茶树体锰元素含量和积累量的变化规律 [J]. *经济林研究*, 2012, 30(1): 19–22. doi: 10.3969/j.issn.1003-8981.2012.01.004.
- [10] CAKMAK I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species [J]. *New Phytol*, 2000, 146(2): 185–205. doi: 10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x.
- [11] HACISALIHOGU G, HART J J, KOCHIAN L V. High- and low-affinity zinc transport systems and their possible role in zinc efficiency in bread wheat [J]. *Plant Physiol*, 2001, 125(1): 456–463. doi: 10.1104/pp.125.1.456.
- [12] HU A T. *Plant Nutrition* [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 105–106.  
胡霁堂. *植物营养学* [M]. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 105–106.
- [13] SNOWDEN R E D, WHEELER B D. Iron toxicity to fen plant species [J]. *J Ecol*, 1993, 81(1): 35–46. doi: 10.2307/2261222.
- [14] MAKSYMIEC W, RUSSA R, URBANIK-SYPNIEWSKA T, et al. Effect of excess Cu on the photosynthetic apparatus of runner bean leaves treated at two different growth stages [J]. *Physiol Plant*, 1994, 91(4): 715–721. doi: 10.1111/j.1399-3054.1994.tb03010.x.
- [15] LI G B, CHEN E Q, ALVA A K. Effects of external copper concentrations on uptake of routine elements by *Citrus* seedling [J]. *J Guangxi Agri Univ*, 1996, 15(3): 195–201.  
黎耿碧, 陈二钦, ALVA A K. 外界铜离子对柑桔小苗常量元素吸收特性的影响 [J]. *广西农业大学学报*, 1996, 15(3): 195–201.
- [16] Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. Determination of Total Silicon, Iron, Aluminum, Calcium, Magnesium, Potassium, Sodium, Phosphorous, Sulfur, Manganese, Cooper, Zinc in Forest Soil (LY/T 1270–1999) [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1999.  
中国林业科学研究院林业研究所. 森林植物与森林枯枝落叶层全硅、铁、铝、钙、镁、钾、钠、磷、硫、锰、铜、锌的测定(LY/T 1270–1999) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [17] FAN H Z, TONG Y A, LÜ S H. Study on seasonal variation of nutrient elements concentration and accumulation in different organs of apple tree [J]. *SW China J Agri Sci*, 2007, 20(6): 1202–1206. doi: 10.3969/j.issn.1001-4829.2007.06.013.  
樊红柱, 同延安, 吕世华. 苹果树体不同器官元素含量与累积量季节性变化研究 [J]. *西南农业学报*, 2007, 20(6): 1202–1206. doi: 10.3969/j.issn.1001-4829.2007.06.013.
- [18] LIU H, WANG W M, YANG X H, et al. Current situation in the study of apple tree mineral nutrition in China [J]. *J Shandong Agri Univ (Nat Sci)*, 2001, 32(2): 245–250. doi: 10.3969/j.issn.1000-2324.2001.02.027.  
刘慧, 王为木, 杨晓华, 等. 我国苹果矿质营养研究现状 [J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2001, 32(2): 245–250. doi: 10.3969/j.issn.1000-2324.2001.02.027.
- [19] GRASSI G, MILLARD P, GOACCHINI P, et al. Recycling of nitrogen in the xylem of *Prunus avium* trees starts when spring remobilization of internal reserves declines [J]. *Tree Physiol*, 2003, 23(15): 1061–1068. doi: 10.1093/treephys/23.15.1061.