

X 射线相衬显微层析及其在野山参特征结构的定量三维成像研究

叶琳琳^{1,2} 薛艳玲¹ 谭海^{1,2} 陈荣昌¹ 戚俊成^{1,2} 肖体乔^{1,2}

(¹ 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 将同步辐射 X 射线同轴相衬显微层析(PPCT)方法应用在野山参特征结构的原位无损成像研究,并利用相位-吸收二重性 Paganin 算法(PAD-PA)实现了同步辐射 X 射线 PPCT 实验数据的相位重建和优化处理,获得了野山参草酸钙簇晶的三维显微结构、体积大小、空间分布和数量分布等定量信息。研究表明,PPCT 方法与相位恢复算法结合可用于如野山参草酸钙簇晶这类中药材显微结构的定量研究。

关键词 X 射线光学;显微特征结构;定量显微层析;同步辐射

中图分类号 O434.19; R282.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1234002

X-Ray Phase Contrast Micro-Tomography and Its Application in Quantitative 3D Imaging Study of Wild Ginseng Characteristic Microstructures

Ye Linlin^{1,2} Xue Yanling¹ Tan Hai^{1,2} Chen Rongchang¹ Qi Juncheng^{1,2} Xiao Tiquiao^{1,2}

(¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In situ non-destructive imaging of characteristic microstructures of wild ginseng are investigated by synchrotron radiation X-ray propagation-based phase-contrast computed tomography (PPCT), and phase-attenuation duality Paganin algorithm (PAD-PA), a phase retrieval algorithm, is employed to process the experimental PPCT data, and the three-dimensional imaging of wild ginseng, such as the quantitative volume, the region and number distributions of calcium oxalate are obtained. The results show that PPCT combines with PAD-PA phase retrieval algorithm is well suit for quantitative study and analysis of microstructures of traditional Chinese medicines like wild ginseng.

Key words X-ray optics; characteristic microstructures; quantitative micro-tomography; synchrotron radiation

OCIS codes 340.7440; 170.6900; 340.7460; 170.6960

1 引言

中国政府现已加快开发利用中药的宝贵价值,努力使其成为具有标准化、现代化和国际化的资源^[1]。人参是最常用的名贵中药材之一^[2-3],目前由于过度采挖,国内的野山参资源已经近于绝迹,成

为稀缺资源,被归为国家一类保护植物^[4]。显微鉴别和理化鉴别是中国药典使用最广泛的中药材研究方法^[5],但是鉴于野山参这类的珍稀物种,即使作为标本也具有极高的收藏价值,因此其植株保存的完整性,甚至末端须根是否完整,都会对野山参的珍稀

收稿日期: 2013-06-14; **收到修改稿日期**: 2013-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(11105213)、国家 973 计划(2010CB834301)

作者简介: 叶琳琳(1983—),女,博士研究生,主要从事 X 射线显微 CT 对中药材鉴定方面的研究。

E-mail: yelinlin@sinap.ac.cn

导师简介: 肖体乔(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事成像光学和 X 射线光学方面的研究。

E-mail: tqxiao@sinap.ac.cn (通信联系人)

价值起到非常重要的影响。草酸钙簇晶是野山参细胞后含物中的重要特征结构,由于存在于植物体内不同类型的结晶及其形态都是比较稳定的,因此不同科、种、属的中药材,对于是否存在晶体、晶体的不同形态、大小和分布情况都具有特异性,所以晶体显微结构的信息一直是研究中药材品种、检索未知药材分类的重要依据。鉴于传统研究方法对样品严格繁琐的制备程序,必然会对野山参这类中药材造成很大的材料损耗和结构破坏,有悖于力图保存野山参完整性和珍贵价值的初衷。既要保存样品完整无损,又要达到研究其内部显微特征结构的目的,X射线成像方法是二者兼得的必然之选。

X射线同轴相位衬度成像(PPCI)方法克服了原有X射线吸收成像不能研究低Z样品的弊端,使X射线探测方法的应用范围扩展到弱吸收材料^[6]。肖体乔课题组^[7-10]近年来对PPCI方法进行了深入的理论和实验研究工作,并且成功将PPCI方法应用在中药材的显微特征结构研究中,取得了初步有效的研究结果,其中对一些较为常见中药材的显微特征结构的X射线显微成像研究^[11]和不同品种人参的显微特征结构的对比研究^[12-13],均表明X射线显微成像是适用于人参等名贵中药材进行显微特征结构研究的新途径。其优势在于节省大量制备样品的时间,减小样品的耗材,可以大幅改善实验效率。但是PPCI获得的成像信息是样品的三维结构在二维方向上的投影,因此出现图像重叠、难于分辨等问题,同时它对制备样品切片依然有厚度限制,所以还未真正达到原位无损研究的目的。

将PPCI方法与同步辐射光源及层析技术相结合,成为X射线同轴相位衬度层析(PPCT)^[14],它充分利用了同步辐射光源的高相干性、高亮度和能量连续可调等独特优势,对生物软组织、聚合物等低Z材料内部的显微结构可以进行无损的三维检测^[15],而且其实验装置简单、操作便捷、成像效果快速高效,在应用研究上非常实用易行^[16]。将PPCT实验数据直接进行切片重构,获得的只是样品的相衬像,是由样品的吸收信息和相位信息的拉普拉斯变换两部分组成,因此图像表现为边缘增强,只能用于定性研究^[17]。随着PPCT应用的不断发展,对成像的质量要求越来越高,除定性分析外,更需要准确的定量数据。不同的科研小组提出了各种对PPCT数据进行相位恢复的方法^[18-20],用定量重构来获得样品的折射率系数或吸收系数。其中的单距相位恢复算法因只需采用一个物象距离的PPCT数据即可进

行相位恢复^[21-22],相比多距PPCT数据的相位恢复算法,减少了数据采集时间和处理难度,更具实用价值。

本文利用PPCT方法研究中药材野山参内草酸钙簇晶的显微结构,以此为例,进行中药材三维结构信息的原位无损研究。并将相位一吸收二重性Paganin算法与PPCT数据重构方法相结合,从而有效提取野山参内草酸钙簇晶的数量、体积含量等精确的定量分析数据。这对含有不同种晶体结构(如草酸钙晶体、碳酸钙晶体、硫酸钙晶体等)的植物中药材和更多具有晶体结构的动植物进行的PPCT成像研究具有普遍的意义。

2 原理与实验

2.1 原理

PPCT主要利用X射线透过弱吸收样品后携带的相位信息对样品成像^[23],同时具有装置简单、成像直观、分辨率高等优点,其成像原理图如图1所示。假设波长为 λ 的平行单色X射线垂直照射样品,样品的复折射率可表示为

$$n(x, y, z) = 1 - \delta(x, y, z) + i\beta(x, y, z), \quad (1)$$

式中 (x, y, z) 为样品的空间坐标, δ, β 分别为样品的相位因子和吸收因子。X射线穿透样品可近似为直线传播,样品的透射函数为^[24]

$$T_{\theta}(x, y) = \exp[-\gamma_{\theta}(x, y) - i\phi_{\theta}(x, y)], \quad (2)$$

式中 θ 表示CT旋转角度,样品的相位函数 $\phi_{\theta}(x, y)$ 和吸收函数 $\gamma_{\theta}(x, y)$ 分别表示为

$$\begin{cases} \phi_{\theta}(x, y) = k \int_{L_{\theta}} \delta(x, y, z) dz, \\ \gamma_{\theta}(x, y) = k \int_{L_{\theta}} \beta(x, y, z) dz, \end{cases} \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\int_{L_{\theta}}$ 表示在X射线传播路径 L 和CT旋转角度 θ 下沿物体的积分。

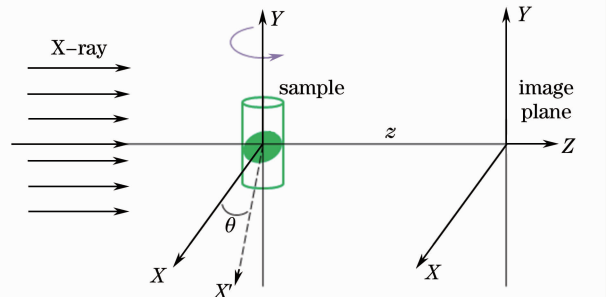


图1 PPCT成像原理图

Fig. 1 Schematic of PPCT imaging

根据 PPCT 原理,探测器采集的光强度分布 $I_{z,\theta}(x,y)$ 为^[18]

$$I_{z,\theta}(x,y) \approx I_{0,\theta} \left(1 - \frac{\lambda z}{2\pi} \nabla^2 \phi_\theta \right), \quad (4)$$

式中 $I_{0,\theta}$ 为距离为 0 时的光强分布。如(4)式所示,获得的投影图像由吸收信息 $I_{0,\theta}$ 和相位信息的拉普拉斯变换 $\nabla^2 \phi_\theta$ 构成,由于相位信息占主导地位,所以在成像中具体表现为边缘增强效应。旋转样品在 180° 内各个旋转角度 θ 下采集样品的 PPCT 投影图像,采用滤波反投影算法进行 PPCT 切片重构,可得到样品内部结构的边缘增强切片,即相衬切片。滤波反投影公式为

$$f(x,y,z) = \int_0^\pi I_{z,\theta}(x,y) \otimes \nu d\theta, \quad (5)$$

式中符号 \otimes 表示卷积, ν 为 PPCT 重构滤波因子, $f(x,y,z)$ 为重构获得的相衬切片。

同时,PPCT 采集得到的投影信息中含有样品的相位信息,可以通过相位恢复方法得到^[21]。当样品为单一均匀介质时,通过求解强度传播方程,可以得到计算样品投影厚度方程^[20],即

$$t(x,y) = \frac{1}{\mu} \ln \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left[\mu \frac{\mathcal{F}(I_{z,\theta}/I_{0,\theta})}{4\pi^2 z \delta(\xi^2 + \eta^2) + \mu} \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 ξ, η 为 x, y 在傅里叶空间对应的坐标。当样品为弱吸收样品时, $I_{0,\theta}$ 近似为 1, 即 $I_{0,\theta} \approx 1$; 同时样品满足相位-吸收二重性, 即 $\delta(x,y,z) = \epsilon\beta(x,y,z)$, 其中 ϵ 为常数。把此近似结果和 $\mu = \frac{4\pi}{\lambda}\beta$ 代入(6)式得

$$\phi_\theta(x,y) = \frac{1}{2} \epsilon \ln \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}(I_{z,\theta})}{1 + \pi \epsilon \lambda z (\xi^2 + \eta^2)} \right] \right\}. \quad (7)$$

由此获得相位-吸收二重性 Paganin 算法 (PAD-PA), 它可以从单距 PPCT 投影图像数据中重构样品的相位信息。要得到样品相位信息的三维分布, 则需对所有的 PPCT 投影图像先进行 PAD-PA 相位信息重构, 再采用滤波反投影算法进行相位信息三维重构, 获得的重构相位因子 $\delta(x,y,z)$ 可表示为

$$\delta(x,y,z) = \frac{1}{k} \int_0^\pi \phi_\theta(x,y) \otimes \nu d\theta. \quad (8)$$

2.2 实验样品及实验条件

实验样本选取产地、等级均确定的长白山五等全须生晒野山参, 经低温干燥预处理过程保持其内部组织形态稳定。选择野山参直径约为 3.7 mm 的

主根下半部位和直径约为 0.67 mm 的须根位置作为实验研究对象。

实验由上海光源(SSRF) X 射线成像及生物医学应用光束线站(BL13W1)完成。BL13W1 是采用 Wiggler 插入件的光束线站, 提供 8~72.5 keV 能段的准平行、高相干性的单色 X 射线光源, 最大束斑尺寸为 45 mm×5 mm。搭建的 PPCT 实验平台中, 光源点到样品台原点的距离为 34 m, 实验样品放置于精密六维运动控制平台上, 探测器选用 Optique Peter 光学系统与 PCO 相机结合的高分辨探测系统。针对样品特点, 光子能量分别选择 14 keV 和 18 keV, 与之对应的 CCD 有效像素尺寸分别为 0.74 μm 和 3.7 μm , 物象距离为 10 cm, 采集 PPCT 重建投影图像数为 1000 张。

3 数据分析与实验结果

3.1 数据分析

对野山参的 PPCT 实验数据直接使用滤波反投影算法对投影数据进行重建, 以获得其相衬切片; 使用 PAD-PA 相位恢复算法对野山参的 PPCT 实验数据进行相位恢复处理, 再使用滤波反投影算法对相位恢复后的投影数据进行重建, 获得其相位切片。野山参须根在横截面方向上获得的二维相衬切片如图 2(a)所示, 边缘增强效应使其显微特征结构的轮廓信息特别明显, 从图 2(c)可以清楚地看出, 在相衬切片中草酸钙簇晶内部结构的灰度值并不统一。二维相位切片如图 2(b)、(d)所示, 其组织结构的边缘增强效应得到了有效消除, 灰度值分布变得比较均匀统一, 从而使草酸钙簇晶结构可以从野山参样品的其他特征结构中清晰地凸显出来。

两种实验数据处理方法获得的成像结果表明, 使用 PAD-PA 相位恢复方法对人参中草酸钙簇晶结构的研究非常有利, 它不仅解决了样品中同质物质在相衬像中灰度值不能统一的问题, 而且使不同组织结构之间的衬比度也有所提高, 所以 PAD-PA 相位恢复方法可以提高草酸钙簇晶的衬度, 使其定量信息可以从野山参的其他组织结构中被提取出来。而对比 PAD-PA 相位恢复处理前后野山参须根中其他特征结构的灰度值, 结果并没有得到显著的提高, 这说明野山参内部其他组织虽然在形态分化上可以归为不同结构, 但是却属于同质物质, 并且完全不同于草酸钙簇晶结构, 这使野山参内草酸钙簇晶的结构信息在相位恢复处理后更容易分辨和进行定量数据提取。所以研究中药材内部具有非同质

物质特性的显微特征结构(如草酸钙簇晶),获得 PPCT 实验数据的同时,还需进行有效的数据处理,如采用 PAD-PA 相位恢复方法处理 PPCT 实验数

据,才更有利于草酸钙簇晶这种显微特征结构的定量研究。

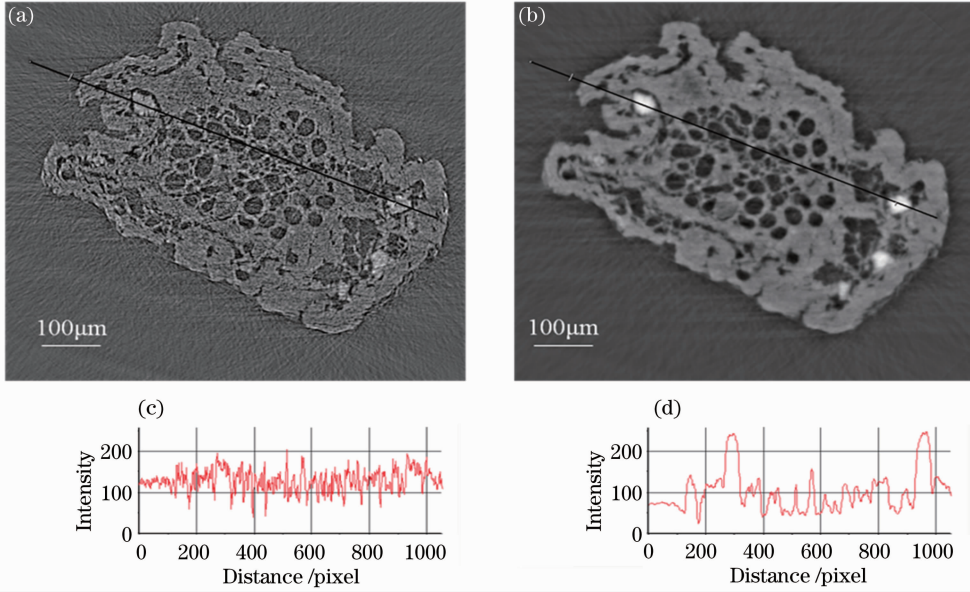


图 2 野山参须根样品 PPCT 重构结果。(a)相位恢复前切片;(b) PAD-PA 相位恢复后切片;
(c)图(a)横线位置的强度分布;(d)图(b)横线位置的强度分布

Fig. 2 PPCT reconstructed slices of wild ginseng fibrous root. (a) Without phase retrieval; (b) with PAD-PA phase retrieval; (c) profile of the dark line in Fig. (a); (d) profile of the dark line in Fig. (b)

3.2 实验结果

对野山参的 PPCT 实验数据进行 PAD-PA 相位恢复算法处理,并使用三维数据定量分析方法和优化处理,进而从相位恢复后的重构结果中提取草酸钙簇晶的有效定量信息及其三维结构。

3.2.1 草酸钙簇晶显微结构

图 3(a)为使用 PAD-PA 相位恢复算法及重构

处理获得的野山参须根显微结构的相位切片,横截面切片中白色虚线框位置标示了一颗具有尖锐棱角结构的典型草酸钙簇晶,由对应的放大细节[图 3(b)、(c)]对比可知:使用 PAD-PA 相位恢复算法处理后,其图像灰度值与定量信息之间的对应变得更为准确;而相衬成像获得的边缘增强效果只能获得草酸钙簇晶显微结构的形态表征。

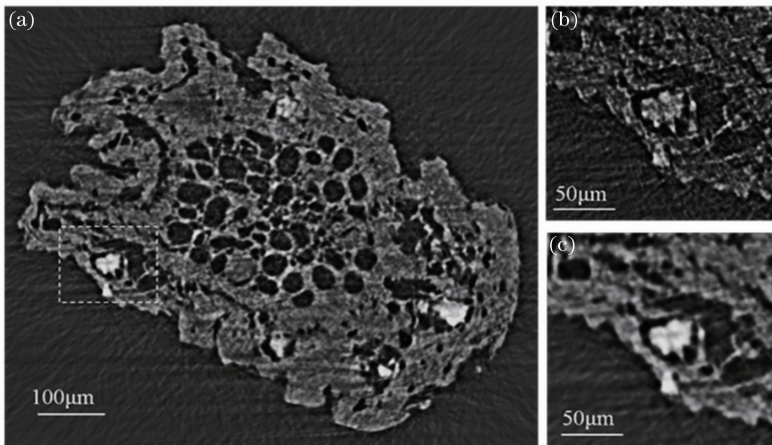


图 3 野山参须根横截面信息。(a)野山参须根横截面 PAD-PA 相位切片;(b) PAD-PA 处理前图(a)标框中草酸钙簇晶相衬像细节图;(c)图(a)标框中草酸钙簇晶相位像细节图

Fig. 3 Slice of wild ginseng fibrous root. (a) Slice of wild ginseng fibrous root with PAD-PA; (b) slice details of calcium oxalate without PAD-PA in the white line box of Fig. (a); (c) slice details in the white line box of Fig. (a)

提取图 3 白色线框中所示的这一颗草酸钙簇晶的三维形态,如图 4 所示,发现从不同视角上观察,其三维结构形态是完全不同的。草酸钙簇晶属于多角形的复杂面型结构,并非光学显微镜二维投影成像看到的简单结构。以往使用传统显微方法研究草酸钙簇晶的结构形态和尺寸,只能在其中一个随机的平面上切割来获得观测,不能避免产生有悖真实

情况的判断,而从多个不同视角获得的三维成像信息可以充分反映这颗草酸钙簇晶的真实形态。鉴于 PPCT 实验与 PAD-PA 相位恢复算法结合所具有的成像优势,将传统显微研究方法中对草酸钙簇晶结构的尺寸衡量标准(以直径大小计算的方式)提升为以体积大小来计算,将更为准确。

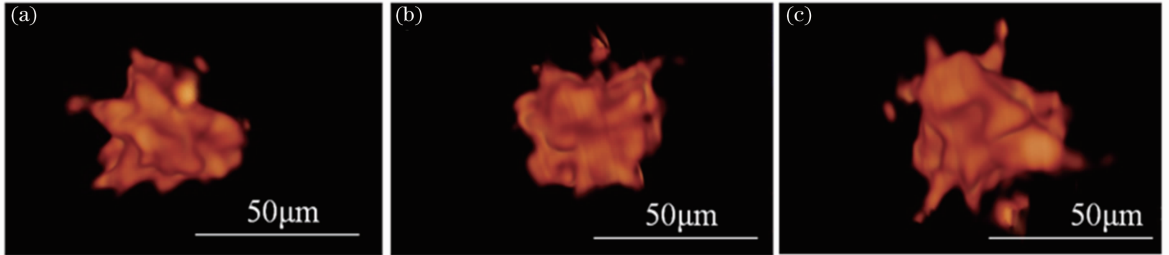


图 4 野山参须根中同一颗草酸钙簇晶的多视角三维形态。(a)四角形态;(b)六角形态;(c)多角形态

Fig. 4 Volume renderings of identical calcium oxalate of the wild ginseng fibrous root. (a) Four corners morphology; (b) hexagonal morphology; (c) polygonal morphology

3.2.2 草酸钙簇晶体积定量提取

通过对 PPCT 实验数据进行 PAD-PA 相位恢复处理,可获得野山参草酸钙簇晶的分布、数量等信息,并可对其体积进行定量数据分析。

长度为 2220 μm 的野山参主根中提取的草酸钙簇晶三维分布如图 5 所示,草酸钙簇晶明显分布在形成层环结构[图 5(a)中 1 所示区域]包围着的内区域[图 5(a)中 2 所示区域]和包围形成层环的

外区域[图 5(a)中 3 所示区域]中。对草酸钙簇晶按不同体积尺寸范围($A_i, i=[1,8]$)进行统计,各体积分布上的总体积和分布百分比也可通过数据分析获得,如图 6 所示,分布百分比 $P(N_i) = V_i/V_{\text{sum}} \times 100\%$,其中 V_i 为草酸钙簇晶在各个体积分布上的总的体积, V_{sum} 为总簇晶体积, N_i 为 A_i 所在范围草酸钙簇晶数量。

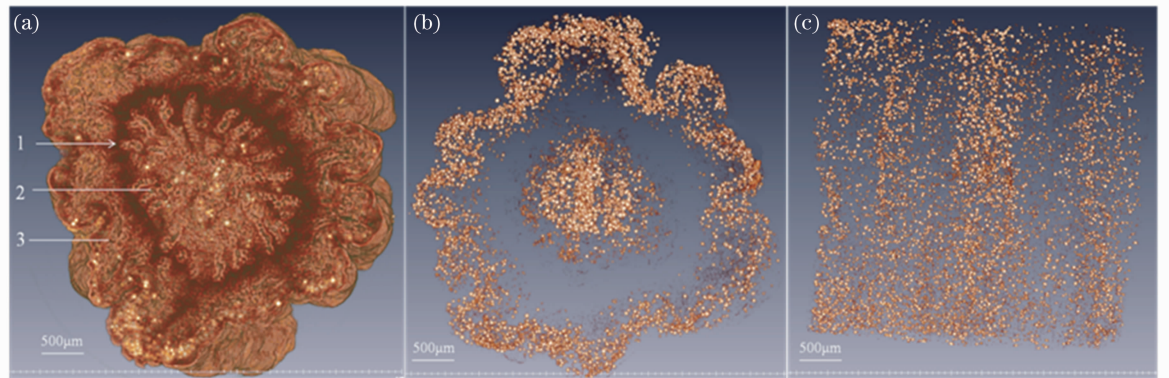


图 5 野山参部分主根结构三维分布。(a)野山参主根三维俯视图;(b)草酸钙簇晶三维俯视图;(c)草酸钙簇晶三维侧视图

Fig. 5 Volume renderings the main root of wild ginseng. (a) 3D planform of the wild ginseng main root; (b) 3D planform of calcium oxalate; (c) 3D lateral view of calcium oxalate

4 结 论

利用第三代同步辐射装置的优势,采用 X 射线同轴相位衬度层析方法,并结合 PAD-PA 相位恢复算法对数据实施优化处理方案,从而对名贵中药材

野山参的典型显微特征结构草酸钙簇晶进行三维成像研究。在原位无损情况下,利用非化学方法实现了对草酸钙簇晶的体积定量信息提取,获得的定量信息可以反映草酸钙簇晶的体积尺寸、数量以及分

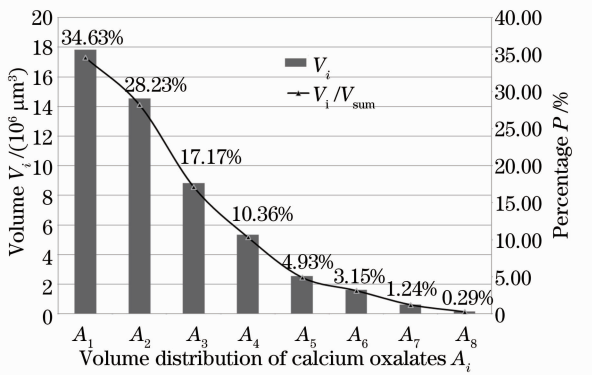


图 6 野山参主根中草酸钙簇晶的总体积分布

Fig. 6 Volume distribution of calcium oxalates of the wild ginseng main root

布规律等丰富内容。研究表明, X 射线同轴相位衬度层析方法结合 PAD-PA 相位恢复算法, 用于中药材或其他类植物的原位无损显微结构研究, 可以获得优质的成像结果和完备的定量数据。

参 考 文 献

1 J Qiu. China plans to modernize traditional medicine[J]. Nature, 2007, 446(7136): 590-591.

2 D Kiefer, T Pantuso. Panax ginseng [J]. American Family Physician, 2003, 68(8): 1539-1542.

3 C X Liu, P G Xiao. Recent advances on ginseng research in China [J]. Journal of Ethnopharmacology, 1992, 36(1): 27-38.

4 D Charron, D Gagnon. The demography of northern populations of Panax quinquefolium (American ginseng) [J]. Journal of Ecology, 1991, 79(2): 431-445.

5 Ren Ren'an. Identification of Traditional Chinese Medicines [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1986. 任仁安. 中药鉴定学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.

6 S W Wilkins, T E Gureyev, D Gao, et al.. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays [J]. Nature, 1996, 384(6607): 335-338.

7 Xie Honglan, Hu Wen, Luo Hongxin, et al.. A new reconstructing algorithm for removing polarization effect of incident X-ray source and twin images in X-ray fluorescence holography [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 7044-7051. 谢红兰, 胡雯, 罗红心, 等. X 射线荧光全息术中消除光源偏振效应和孪生像的重构新算法[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 7044-7051.

8 Liu Lixiang, Du Guohao, Hu Wen, et al.. Effect of some factors on imaging quality of X-ray in-line outline imaging [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4556-4564. 刘丽想, 杜国浩, 胡雯, 等. X 射线同轴轮廓成像中影响成像质量的若干因素研究[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4556-4564.

9 T Q Xiao, A Bergamaschi, D Drossi, et al.. Effect of spatial coherence on application of in-line phase contrast imaging to synchrotron radiation mammography [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2005, 548(1-2): 155-162.

10 Liu Huiqiang, Wang Yudan, Ren Yuqi, et al.. Investigation on X-ray micro-computed tomography suitable for organic compound samples based on modified Bronnikov algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0434001. 刘慧强, 王玉丹, 任玉琦, 等. 采用吸收修正 Bronnikov 算法的有机复合样品的 X 射线显微计算机层析研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0434001.

11 X Wei, T Q Xiao, L X Liu, et al.. Application of X-ray phase contrast imaging to microscopic identification of Chinese medicines [J]. Physics in Medicine and Biology, 2005, 50(18): 4277-4286.

12 Xue Yanling, Xiao Tiqiao, Du Guohao, et al.. Microscopic identification of panax quinquefolium and panax ginseng by X-ray phase contrast imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1828-1832. 薛艳玲, 肖体乔, 杜国浩, 等. 西洋参和高丽白参的 X 射线显微鉴定研究[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1828-1832.

13 Xue Yanling, Xiao Tiqiao, Wu Lihong, et al.. Investigation of characteristic microstructures of wild ginseng by X-ray phase contrast microscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5496-5507. 薛艳玲, 肖体乔, 吴立宏, 等. 利用 X 射线相衬显微研究野山参的特征结构[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5496-5507.

14 C Raven, A Snigirev, I Snigireva, et al.. Phase-contrast microtomography with coherent high-energy synchrotron X-rays [J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(13): 1826-1828.

15 Chen Rongchang, Xie Honglan, Du Guohao, et al.. Experimental investigation on X-ray micro-computed tomography by phase retrieval with born approximations [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1106-1111. 陈荣昌, 谢红兰, 杜国浩, 等. 基于玻恩近似相位恢复的 X 射线显微 CT 实验研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1106-1111.

16 E M Friis, P R Crane, K R Pedersen, et al.. Phase-contrast X-ray microtomography links cretaceous seeds with gnetales and bennettitales [J]. Nature, 2007, 450(7169): 549-552.

17 P Cloetens, R Barrett, J Baruchel, et al.. Phase objects in synchrotron radiation hard X-ray imaging [J]. J Phys D Appl Phys, 1996, 29(1): 133-146.

18 K A Nugent, T E Gureyev, D F Cookson, et al.. Quantitative phase imaging using hard X-rays [J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(14): 2961-2964.

19 P Cloetens, W Ludwig, J Baruchel, et al.. Holotomography: quantitative phase tomography with micrometer resolution using hard synchrotron radiation X-rays [J]. Appl Phys Lett, 1999, 75(19): 2912-2914.

20 D Paganin, S C Mayo, T E Gureyev, et al.. Simultaneous phase and amplitude extraction from a single defocused image of a homogeneous object [J]. J Microsc, 2002, 206(1): 33-40.

21 R C Chen, H L Xie, L Rigon, et al.. Phase retrieval in quantitative X-ray microtomography with a single sample-to-detector distance [J]. Opt Lett, 2011, 36(9): 1719-1721.

22 A Groso, R Abela, M Stampanoni. Implementation of a fast method for high resolution phase contrast tomography [J]. Opt Express, 2006, 14(18): 8103-8110.

23 R Fitzgerald. Phase-sensitive X-ray imaging [J]. Phys Today, 2000, 53(7): 23-26.

24 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. New York: Cambridge University Press, 1999.

栏目编辑: 史敏