

· 技术方法 ·

## 新疆阿魏特征显微结构的三维原位无损研究

刘慧强<sup>1\*</sup>, 凯撒·苏来曼<sup>2</sup>, 孙芸<sup>3</sup>, 庞渊<sup>4</sup>, 樊孝喜<sup>1</sup>, 谢茹<sup>1</sup>, 柳超<sup>1</sup>, 段颖妮<sup>1</sup>, 马燕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新疆医科大学医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011; <sup>2</sup>新疆维吾尔自治区中药民族药研究所, 乌鲁木齐 830002

<sup>3</sup>新疆医科大学中医学院, 乌鲁木齐 830011; <sup>4</sup>乌鲁木齐市中医医院, 乌鲁木齐 830000

**摘要** 利用新型第三代高亮度同步辐射光源相衬成像技术, 可实现弱吸收(主要含碳、氢、氧和氮等元素)物质材料特征结构的无损三维鉴定。以具有极高药用价值的新疆地产药材——阿魏(*Ferula*)为研究对象, 采用同步辐射高分辨X射线相衬显微CT技术, 并结合相位恢复算法, 有效解析和评价了新疆阿魏(*F. sinkiangensis*)的三维特征结构, 极大提高了对药材类生物样品的显微结构和密度的分辨能力, 从而为新疆阿魏的特征分辨、品质鉴定和真伪识别提供了一种直观可靠的三维可视化新手段。

**关键词** 同步辐射光源, 相衬显微CT, 相位恢复, 显微结构鉴定, 新疆阿魏

刘慧强, 凯撒·苏来曼, 孙芸, 庞渊, 樊孝喜, 谢茹, 柳超, 段颖妮, 马燕 (2018). 新疆阿魏特征显微结构的三维原位无损研究. 植物学报 53, 364–371.

阿魏(*Ferula*)是新疆一种独特的药材, 属伞形科, 多年生草本植物, 渐危种, 生长在海拔750–1 000 m较为寒冷和干旱的灰钙型荒漠土壤中。其株高50–100 cm, 茎直立, 全株被白色绒毛, 根肥大, 圆柱形或纺锤形, 有时分枝, 表皮紫黑色, 有臭气, 开黄色小花。阿魏味辛、温, 有理气消肿、活血消疲、祛痰和兴奋神经的功效, 是治疗风湿性关节炎和胃病的良药, 部分药典还用它驱虫和治疗白癜风。阿魏的药用部位主要是根茎和种子, 活性成分为阿魏酸酯(阿魏胶)。在全国中草药调查中发现, 新疆阿魏有20多个品种, 收入药典可作药用的只有2种: 新疆阿魏(*F. sinkiangensis*)和阜康阿魏(*F. fukanensis*) (黎耀东等, 2016)。由于这2种野生阿魏资源受破坏严重, 目前阜康阿魏已灭绝, 野生新疆阿魏也只在伊犁伊宁县喀什乡拜什墩山区有分布, 成为全疆仅存的药用野生阿魏。在《野生药材资源保护管理条例》中, 新疆阿魏被列为二级保护重要野生药材物种。由于新疆阿魏价格一路飙升且分类性状不明显, 市场上出售的阿魏药材往往以次充好、真假难辨, 因此, 有必要对其特征结构和品质分类加以鉴定。

中药显微鉴定通常采用显微镜来观察药材的组

织构造、细胞形状及细胞内含物的特征, 可用于鉴定药材的真伪、纯度甚至品质(孔好等, 2008)。现有的中药显微鉴定手段包括光学显微法和电子显微法, 2种方法对样品的制备都有较高要求, 如样品要经过固定、脱水、包埋、石蜡切片及样品表面导电处理等复杂的过程, 导致整个实验费时费力、效率低, 而且可能损坏细胞的原生显微结构, 难以实现活细胞成像(刘家熙和阎秀峰, 2005)。此外, 为了鉴定需要, 鉴定过程中经常要加入某些特定的化学试剂, 这些试剂在起作用的同时有可能会破坏药材中其它有用的结构鉴定信息(黄博等, 2010; 徐晓琴等, 2013)。利用以上方法进行显微结构研究只能获得二维显微信息, 只适用于超薄生物切片, 无法实现完整的原位三维结构观察。为实现中药现代化, 我国政府积极推进中药标准化, 强化中药的基础和临床研究, 并加强对出口中药制剂的成分检测和质量控制。基于显微鉴别研究现状和中药标准化需求, 本研究利用具有波长短、穿透能力强、亮度高、能量可调、单色性准和准直性高等特点的现代同步辐射硬X射线技术, 结合同轴相衬成像方法、相位恢复算法及CT重构技术, 实现新疆阿魏微米级分辨率的无损三维原位结构的显微鉴定。

收稿日期: 2017-05-23; 接受日期: 2017-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(No.81660306, No.11475248, No.11505277)

\* 通讯作者。E-mail: hqliu@xjmu.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 新疆阿魏实验样品

实验材料为新疆野生阿魏(*Ferula sinkiangensis* K. M. Shen) (图1A), 由新疆中药民族药研究所药材标本库提供, 产地为新疆伊犁。实验选取新疆阿魏根茎、节结及种子等部分, 无须任何特殊处理, 采用徒手切割法加工成小圆柱状, 直径在1–2 mm左右, 封装入离心管中固定(图1B), 可直接进行X射线相衬显微CT实验和成像投影观察。相比电镜观察制备法的脱水、染色及石蜡包埋等复杂处理过程, 上述方法更加简便易行, 且可实现原位检测甚至活体直接二维观测。

### 1.2 实验装置与相衬成像原理

本实验利用国际先进的第三代同步辐射装置——上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)进行检测。SSRF是一台第三代同步辐射装置, X射线成像与生物医学应用线站(BL13W1)是其首批建造的7条光束线站之一(肖体乔等, 2014; Xie et al., 2015)。BL13W1以扭摆器(Wiggler)插入件为光源, 光学设计简单易行, 核心部件为间接液氮冷却双晶单色器, 提供能量范围为8–72.5 keV、光斑尺寸45 mm (H) × 5 mm (V)的连续可调的硬X射线高通量光子输出, 可直接对中药材样品开展X射线同轴相衬显微CT成像(Propagation-based Phase-contrast Computed Tomography, PPCT) (图2)。Wiggler距离样品台34 m, 探测器可通过精密导轨该方法前后调节, 选择最佳物像距离(Sample-to-Detector Distance, SDD)。防震光学平台上装有六维工作台, 用于开展相衬显微相衬CT实验、光路校轴和样品对准。由于该方法装置简单、对光源相干性要求低、成像直观且分辨率高, 因此非常适合对植物样品、生物软组织、高分子聚合材料以及植物药材等低Z样品成像(薛艳玲等, 2010; 叶琳琳等, 2013, 2014; Ye et al., 2013, 2016; Xue et al., 2016), 其成像原理见图2。对于强吸收样品(红色小球), 透射X射线可直接成清晰吸收像; 对于弱吸收样品(蓝色小球), 入射X射线透过样品在空间传播一定距离后(菲涅耳衍射区内)形成清晰相衬像强度分布。由于光源点距离样品台为34 m和单色器能量选择, 可将入射光波近似为单色平面波入射, 其像场复振幅的空间传播规律满足菲涅耳衍射积分:

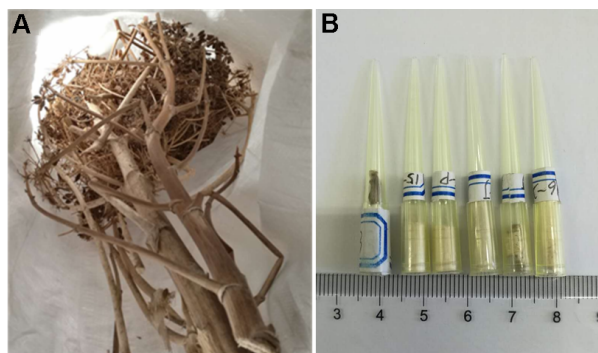


图1 新疆阿魏药用部位(A)与实验样品(B)

Figure 1 The medicinal part of *Ferula sinkiangensis* (A) and experimental samples (B)

$$U(x, y) = -\frac{i \exp(ikZ)}{\lambda Z} \iint T(u, v) \times \exp\left\{i \frac{k}{2Z} [(x-u)^2 + (y-v)^2]\right\} dudv \quad (1)$$

则样品在像场强度分布可直接表示为:

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 \quad (2)$$

因此, 利用X射线透射样品后的相位信息成像, 可以得到样品边缘增强图像(相衬像), 有效探测弱吸收生物样品的内部结构信息及形态分布。同时, 相位恢复能从PPCT采集到的图像中重构出弱吸收样品的高衬度相位信息, 并用于定量研究(刘慧强等, 2012a, 2012b)。本文结合Paganin等(2012)提出的基于强度传递方程(Transport of Intensity Equation, TIE)的单距相位恢复算法, 如下所示:

$$\varphi(x, y) = \frac{\delta}{2\beta} \ln \left( F^{-1} \left\{ \frac{F[I(x, y)/I_0(x, y)]}{1 + [\lambda Z \delta / (4\pi\beta)](u^2 + v^2)} \right\} \right) \quad (3)$$

其中,  $F$ 和 $F^{-1}$ 分别代表傅立叶变换和逆傅立叶变换;  $I(x, y)$ 和 $I_0(x, y)$ 分别代表样品投影像强度和背景像光强; 物像距离 $SDD=Z$ ;  $\delta$ 和 $\beta$ 分别代表样品的相位信息和吸收信息。

### 1.3 探测器与实验参数选择

实验采用风冷式高分辨X射线探测器(C11440-22C, Hamamatsu Photonics, Japan), 操作简单易行, 配以10  $\mu\text{m}$ 厚闪烁体, 将X射线转化成可见光通过光学

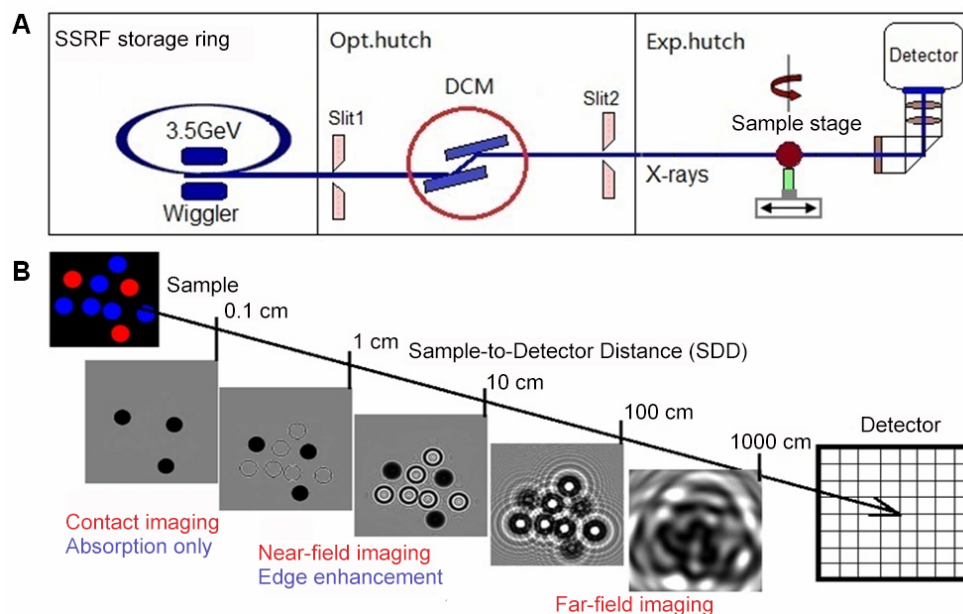


图2 上海光源X射线成像及生物医学应用线站(BL13W1)实验光路示意图(A)和基于标量衍射的同轴相衬成像(PPCT)原理图(B)

Figure 2 Schematic of X-ray imaging and biomedicine application Beamline (BL13W1) at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) (A) and the principle of propagation-based phase-contrast computed tomography (PPCT) (B)

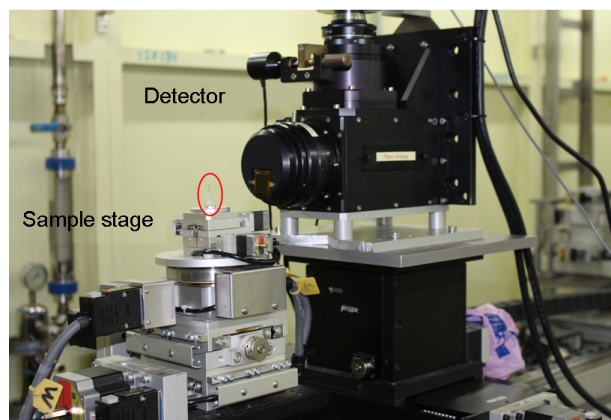


图3 上海光源X射线成像与生物医学应用线站(BL13W1)实验平台  
包括高精度六维样品台(样品置于红色椭圆处的套管中)以及高分辨X射线探测器。

Figure 3 Experimental platform of biomedicine application Beamline (BL13W1) at Shanghai Synchrotron Radiation Facility  
The platform included high-precision sample stage (samples located in the tube marked with red circle) and high-resolution X-ray detector.

透镜在CMOS阵列上成像, 其原始像素为 $6.5 \mu\text{m}$ , 结合2倍光学镜头, 可实现等效像素为 $3.25 \mu\text{m}$ ; 样品置

于六维高精度位移样品台(KOHZU, Japan)上(如图3红色椭圆内所示)。该实验经过理论估算和实验优化, 选择以下实验参数: 电子存储环为Top-Up模式, 运行束流250 mA, 光子能量15 keV, 样品至探测器距离(SDD)为180 mm, 曝光时间600 ms。采用远程控制软件操作样品与光路对准, 所有实验数据均用ImageProPlus6.0图像软件进行采集, 采用上海光源BL13W1自主研发的PITRE3软件进行CT数据重构。

## 2 结果与讨论

本研究利用第三代同步辐射X射线相衬显微CT技术, 结合相位恢复算法, 实现了新疆阿魏样品内部特征结构的高衬度三维无损成像。以新疆阿魏显微鉴别的特征结构为目的, 通过对不同药材部位的横向切割图、冠状面切割图、子午面切割图及其三维体视图和特征提取等多角度多形态信息进行分析, 主要展示了对新疆阿魏鉴别意义重大且显微特征出现频率较高的实验结果, 包括木质部微管束(导管)、韧皮薄壁细胞、淀粉粒、阿魏酸酯晶柱、木栓纤维及结节分叉点和种子特征结构等。

## 2.1 根茎部显微特征

根茎输导组织是具类似导管结构的大量微管束, 是植物体内输送水分、无机盐和营养物质等的重要保障。其显微特征结构主要为导管的微观形貌, 根据其导管细胞壁增厚形成的微管束大小不同, 通过对新疆阿魏在横(图4A)、纵(图4B)和子午面(图4C) 3个切面方向上的PPCT截面图进行分析、测量和统计, 发现其主导管分布较为均匀, 网纹导管结构垂直分布, 其直径约为50–90  $\mu\text{m}$ , 以独立导管为主, 部分含有外切双导管和内切双导管(图4标记1); 导管由内涵韧皮部薄壁细胞构成, 直径10–18  $\mu\text{m}$ , 主要呈纵向网格状分布, 基本呈方孔纹形, 部分亦呈圆孔纹状分布(图4标记2); 木栓纤维束清晰可见, 横向结构呈团簇状, 纵向呈柱状结构, 其密度远高于周边木质部结构, 结构致密, 部分内涵微空隙, 纵深分布, 大多数近导管外侧分布(图4标记3); 淀粉粒清晰可见, 分布密度适中, 组织密度高于周边组织, 绝大多数为单粒, 形貌圆润, 复粒亦见, 直径约为25–30  $\mu\text{m}$  (图4标记4); 阿魏酸酯簇晶结构较为圆钝, 组织密度最大, 直径约为60–70  $\mu\text{m}$ , 主要分布在较大导管附近, 与无机盐的输导和浸润关系密切, 是用于显微鉴别的又一特征结构(图4标记5)。

采用PPCT相位恢复算法进一步处理后, 图像信噪比得到大幅提升, 可有效区分不同植物组分, 并进行三维重构和渲染, 得到丰富的样品立体结构信息和形态特征的原位分布图(图5A), 可清晰展示图4中所分析的各显微特征结构的三维原位结构和形态分布, 如导管、薄壁细胞簇和致密纤维束等不同伪彩色立体特征, 为新疆阿魏的显微鉴定提供了一种有效方法。图5B和C分别显示基于不同视角及灰度定量分割下所得到的纤维束、淀粉粒和阿魏酸酯簇晶三维结构与特征分布, 致密纤维束沿导管纵向三维分布, 提供输导支架作用, 淀粉颗粒和阿魏酸酯簇晶呈球形, 表面平钝, 靠近导管分布。

## 2.2 茎节叉部显微特征

新疆阿魏茎节叉部具有明显的显微特征结构, 亦可用于鉴别新疆阿魏。如图6A–C所示, 除可见外缘分布韧皮部薄壁细胞和大量导管束外, 尤其明显可见其节结分叉线, 高密度高亮度的弯曲延长分布(如白色实线

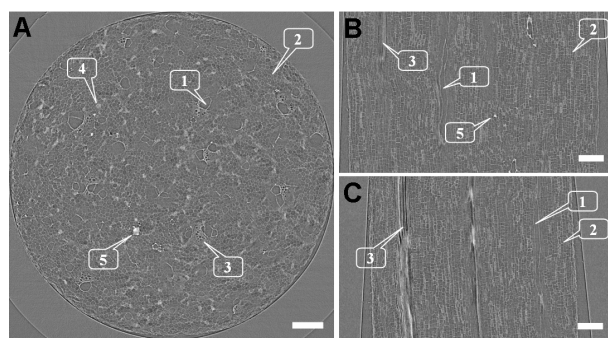


图4 新疆阿魏根茎部同轴相衬显微CT成像(PPCT)重构结果的三切面图

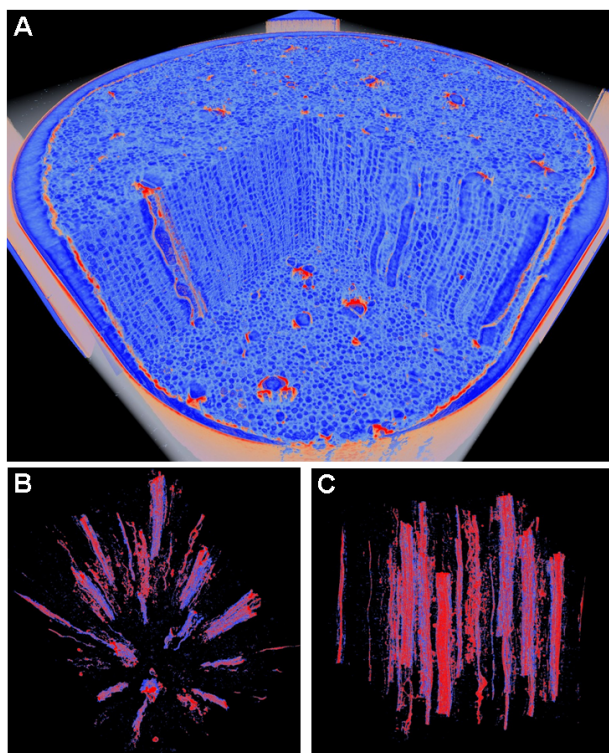
(A) 横向切割图; (B) 冠状面切割图; (C) 子午面切割图。1: 导管; 2: 内涵韧皮部薄壁细胞; 3: 木栓纤维束; 4: 淀粉粒; 5: 微阿魏酸酯簇晶(此图仅是样品重构切片的某一层, 具有代表性, 可观察到密度较高的阿魏酸酯簇晶, 表现为高亮度的像素分布)。Bars=150  $\mu\text{m}$

Figure 4 Slices of Propagation-based Phase-contrast Computed Tomography (PPCT) reconstructed results of root-stem position of *Ferula sinkiangensis*

(A) Transverse section; (B) Coronary section; (C) Saggital section. 1: Vessels; 2: Included phloem parenchyma cells; 3: Xylem fiber bundles; 4: Starch grain; 5: Clusters of oryzanolium crystal (a representative image showing the distribution of high density oryzanolium crystal with bright pixels). Bars=150  $\mu\text{m}$

箭头所指), 其一侧具有典型的横向致密纤维束, 呈射线状典型分布, 末端分布较多圆形微导管束, 且数量较为密集, 团簇束直径约100  $\mu\text{m}$  (如白色虚线箭头所示)。另外, 在子午面(图6C)和冠状面图(图6B)中, 亦发现大量横向纤维束存在, 可作为新疆阿魏典型的显微特征结构之一。此外, 子午面和冠状面数字切片展示高致密长纤维束内含大量圆形薄壁细胞且呈纵向分布(如白色长点箭头所指), 在部分区域发现横向导管, 其直径与纵向相似, 在部分横向导管近处亦发现阿魏酸酯晶粒的堆积, 其簇晶的结构及大小分布是用于显微鉴别的又一特征结构。

图7A–C为采用PPCT相位恢复算法和三维重构渲染后的茎节叉部的立体结构和形态原位分布, 用不同伪彩色展示了分叉线、横向射线组织及致密纵向纤维束等立体特征。其中, 图7B和C分别显示不同视角下利用灰度定量分割所得到的致密纤维束的三维结构与特征分布, 为新疆阿魏的三维原位显微鉴定提供



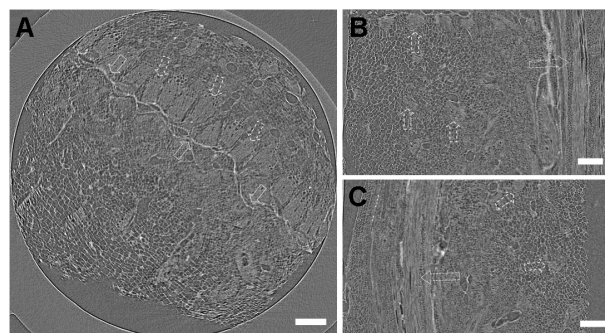
**图5** 新疆阿魏根茎部同轴相衬显微CT成像(PPCT)三维渲染重构体视图

(A) 根茎部各组分的彩色显微特征体结构(其中浅蓝色代表植物细胞壁和管径,深蓝色代表植物导管空腔和孔隙);(B),(C) 基于相位恢复算法定量提取的纤维束导管(蓝色)、淀粉粒(蓝紫色)及阿魏酸酯簇晶(红色)不同角度的三维结构及特征分布。

**Figure 5** 3D-renderings of Propagation-based Phase-contrast Computed Tomography (PPCT) reconstructed results of root-stem position of *Ferula sinkiangensis*

(A) Volumetric visualization of the whole sample with different colors (light blue denotes plant cell walls and ducts; dark blue denotes duct cavities and holes); (B), (C) Quantitative segmentation of xylem fiber bundles (blue color), starch grain (bluish violet color) and oryzanolium crystal (red color) with different views based on phase retrieval algorithm.

了一种有效方法,而传统的显微CT由于各组分灰度直方图重叠,无法进行定量分割和提取,从而无法进行典型植物组织结构的三维特征显示和鉴别。通过与图5的三维体视图进行比较,可以发现新疆阿魏在节结叉口处的致密纤维束分布密度远高于其它部位,并且呈现出横向放射状特征,且内部伴生大量圆形薄壁细胞;附近的横向导管相对密集,为阿魏酸酯晶粒形成奠定了环境基础,尤其以叉口高密线状弯曲分布。



**图6** 新疆阿魏茎节叉部同轴相衬显微CT成像(PPCT)重构结果的三切面图

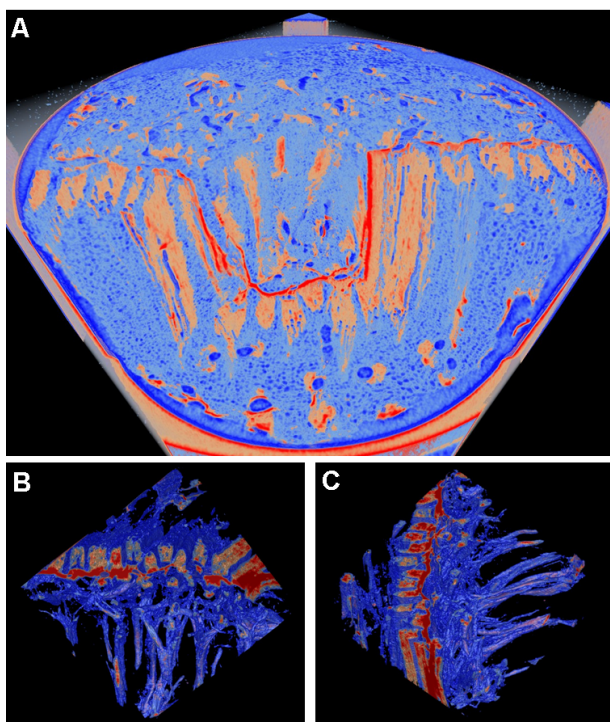
(A) 横向切割图;(B) 冠状面切割图;(C) 子午面切割图。白色实线箭头示节结分叉线,分布高密度阿魏酸酯晶粒(白色高亮的颗粒分布);白色虚线箭头示横向纤维束,呈射线状,内含纵向微管束;白色长点箭头示高致密管状木栓纤维束,内含圆形薄壁细胞群。Bars=150  $\mu$ m

**Figure 6** Slices of Propagation-based Phase-contrast Computed Tomography (PPCT) reconstructed results of stem bifurcation position of *Ferula sinkiangensis*

(A) Transverse section; (B) Coronary section; (C) Saggital section. White solid arrows denote branch lines with high gray level, composed of oryzanolium crystal; White dash arrows denote transversal fiber bundles, including longitudinal micro-tubes; White long dot arrows denote high dense xylem fiber bundles with circular parenchyma cell group. Bars=150  $\mu$ m

### 2.3 种子显微特征

种子是中药材中常见的药用部位,大多数伞形科植物种子的外部形态和气味非常相近,因此难以辨别、容易混淆,而其药用功效却迥异,主要是由于所含的挥发油成分不同。传统的结构鉴定方法在样品切片制备的过程中,需要经过化学试剂透化处理,工艺复杂、操作烦琐,且油细胞结构容易受到破坏。图8A为无需对样品进行任何化学处理的新疆阿魏种子PPCT原位无损的三维显微特征结构体视图,可从多视角对种子内部显微结构进行数字切割,从而获得实验样品部位内部的三维显微结构分布,如胚组织细胞形态、外胚乳组织细胞形态、油管结构形态、淀粉类结构及分布等。其中,新疆阿魏种子种皮双瓣对称,扁平状,厚度约60  $\mu$ m,合围中空(图8B),其间有双油管并行分布,直径约为40  $\mu$ m (图8D);双子叶肥大扁平,壁厚约80  $\mu$ m,内含胚囊及胚芽,呈椭圆状分布,长轴方向约200  $\mu$ m,另现较大淀粉粒,直径约150  $\mu$ m,为胚胎发



**图7** 新疆阿魏茎节叉部同轴相衬显微CT成像(PPCT)三维渲染重构体视图

(A) 不同颜色代表茎节叉部各组分的显微特征体结构(浅蓝色代表植物细胞壁和管径, 深蓝色代表植物导管空腔和孔隙); (B), (C) 基于相位恢复算法的定量提取分叉线(蓝紫色)及横向纤维束(红色)的不同角度三维结构及特征分布。

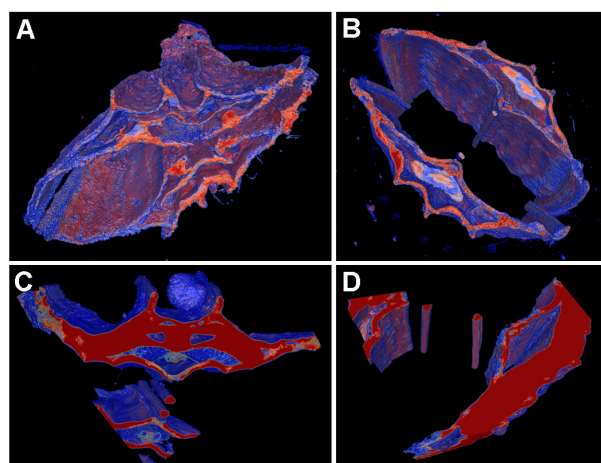
**Figure 7** 3D-renderings of Propagation-based Phase-contrast Computed Tomography (PPCT) reconstructed results of stem bifurcation position of *Ferula sinkiangensis*

(A) Volumetric visualization of the whole sample with different colors (light blue denotes plant cell walls and ducts, dark blue denotes duct cavities and holes); (B), (C) Quantitative segmentation of bifurcation lines (bluish violet color) and transversal xylem fiber bundles (red color) with different views based on phase retrieval algorithm.

育提供足够能量(图8C)。因此, 对于含有挥发油成分种子的中药材而言, 使用基于同步辐射PPCT三维高分辨成像方法具有无损原位探测和无须制备复杂样品的优势, 可以有效克服传统成像方法的不足, 对于药材的鉴定有重要意义。

### 3 结论

与传统的植物切片和粉末显微观察法不同, 本实验利



**图8** 基于相位恢复的新疆阿魏茎种子部同轴相衬显微CT成像(PPCT)三维渲染重构体视图(不同颜色代表种子各组分的显微结构特征: 由外及里为种皮、子叶、胚芽、淀粉粒和油管等结构) (A) 种子顶部横断面图; (B) 种子中部横断面图; (C) 种子内淀粉粒体视图和子叶组织; (D) 种子内油管的三维结构及特征分布

**Figure 8** 3D-renderings of Propagation-based Phase-contrast Computed Tomography (PPCT) reconstructed results of seeds of *Ferula sinkiangensis* (different colors showing the seed coat, cotyledon, embryo, starch grain and pipeline from outside to inside of seed)

(A) Volumetric visualization of the top part of seed sample; (B) The central part of seed sample; (C) 3D visualization of grain starch and cotyledon in seed; (D) 3D visualization and characteristic distribution of oil tubes in seed.

用同步辐射高亮度、高分辨X射线相衬显微CT技术, 无须对植物样品进行微米级切割、染色、脱水及固定等复杂程序, 仅做简单的脱水处理, 即可实现新疆阿魏出现频率较高的多方位结构信息和三维原位特征分布, 如木质部导管、木栓层细胞、横向纤维束、阿魏酸酯和淀粉粒等细胞后含物等, 并提出结合PPCT的相位恢复算法, 对实验数据进行处理和特征部位定量提取, 实现了从多视角对其内部显微结构进行解析, 有效评价新疆阿魏三维显微特征结构与功能的关系, 从而为新疆阿魏的鉴定与开发利用提供一种高分辨三维特征结构显示和提取的无损成像手段。该技术有望在植物学、生物医学及材料科学等诸多领域进行推广应用, 尤其对于能够获得低Z的样品(如生物组织、纤维混合物及聚合物的内部微细结构), 是一种无

损的三维立体检测方法。

**致谢** 感谢上海光源X射线成像及生物医学应用光束线站(BL13W1)实验技术人员在实验过程中所提供的帮助和支持。

## 参考文献

- 黄博, 姜兆玉, 屈红霞, 马三梅 (2010). 龙牙花不同花器官的表皮形态. *植物学报* **45**, 594–603.
- 孔好, 王忠, 顾蕴洁, 汪月霞 (2008). 植物根内通气组织形成的研究进展. *植物学通报* **25**, 248–253.
- 黎耀东, 付淑媛, 何江, 樊丛照, 李晓瑾 (2016). 新疆特有药用植物新疆阿魏资源现状与分析. *中国现代中药* **18**, 714–718.
- 刘慧强, 任玉琦, 周光照, 和友, 薛艳玲, 肖体乔 (2012). 相移吸收二元性算法用于X射线混合衬度定量显微CT的可行性研究. *物理学报* **61**, 078701.
- 刘慧强, 王玉丹, 任玉琦, 薛艳玲, 和友, 郭瀚, 肖体乔 (2012). 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. *光学学报* **32**, 0434001.
- 刘家熙, 阎秀峰 (2005). 西藏产四种卷柏科植物的孢子形态观察. *植物学通报* **22**, 44–49.
- 肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 杜国浩, 陈荣昌 (2014). 上海光源X射线成像及其应用研究进展. *光学学报* **34**, 0100001.
- 徐晓琴, 倪慧, 魏鸿雁, 贾晓光, 张本刚, 卿德刚 (2013). 新疆地产三种肉苁蓉的显微鉴别研究. *时珍国医国药* **24**,

881–883.

- 薛艳玲, 肖体乔, 吴立宏, 陈灿, 郭荣怡, 杜国浩, 谢红兰, 邓彪, 任玉琦, 徐洪杰 (2010). 利用X射线相衬显微研究野山参的特征结构. *物理学报* **59**, 5496–5507.
- 叶琳琳, 薛艳玲, 倪梁红, 肖体乔 (2014). 种子类中药材的三维显微结构的原位研究. *中国中药杂志* **39**, 2619–2623.
- 叶琳琳, 薛艳玲, 谭海, 陈荣昌, 戚俊成, 肖体乔 (2013). 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. *光学学报* **33**, 1234002.
- Paganin D, Mayo SC, Gureyev TE, Miller PR, Wilkins SW (2002). Simultaneous phase and amplitude extraction from a single defocused image of a homogeneous object. *J Microscopy* **206**, 33–40.
- Xie HL, Deng B, Du GH, Fu YN, Chen RC, Zhou GZ, Ren YQ, Wang YD, Xue YL, Peng GY, He Y, Guo H, Xiao TQ (2015). Latest advances of X-ray imaging and biomedical applications beamline at SSRF. *Nucl Sci Tech* **26**, 020102.
- Xue Y, Liang Z, Tan H, Ni L, Zhao Z, Xiao T, Xu H (2016). Microscopic identification of Chinese medicinal materials based on X-ray phase contrast imaging: from qualitative to quantitative. *J Instrum* **11**, C07001.
- Ye LL, Xue YL, Ni LH, Tan H, Wang YD, Xiao TQ (2013). Application of X-ray phase contrast micro-tomography to the identification of traditional Chinese medicines. *J Instrum* **8**, C07006.
- Ye LL, Xue YL, Wang YD, Qi JC, Xiao TQ (2016). Identification of ginseng root using quantitative X-ray microtomography. *J Ginseng Res* **41**, 290–297.

### 3-D *In-situ* Non-destructive Structural Characterization of *Ferula sinkiangensis*

Huiqiang Liu<sup>1\*</sup>, Sulaiman·Kaisa<sup>2</sup>, Yun Sun<sup>3</sup>, Yuan Pang<sup>4</sup>, Xiaoxi Fan<sup>1</sup>, Ru Xie<sup>1</sup>  
Chao Liu<sup>1</sup>, Yingni Duan<sup>1</sup>, Yan Ma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Medical Engineering and Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China; <sup>2</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Traditional Chinese Medicine and Ethno-Medicine, Urumqi 830002, China; <sup>3</sup>College of Chinese Medicine, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China; <sup>4</sup>Urumqi Hospital of Traditional Chinese Medicine, Urumqi 830000, China

**Abstract** Synchrotron-based X-ray phase-contrast micro-tomography is being used for achieving nondestructive and 3-D characterization due to the high contrast imaging of low Z materials (consisting of C, H, O, N elements). In this paper, we present a new method to combine the high resolution synchrotron-based X-ray phase-contrast imaging technology and phase retrieval algorithm for analyzing and evaluating the 3D inner micro-structures and nondestructive characteristic structures of *Ferula sinkiangensis*. The method successfully revealed the 3-D micro-structures and characteristics of *F. sinkiangensis* with high-density resolution, demonstrating that the method is an intuitive and reliable tool of 3D visualization, which has good potential for characterizing and identifying Chinese medicine materials.

**Key words** synchrotron radiation source, phase-contrast micro-tomography, phase retrieval, microscopic identification, *Ferula sinkiangensis*

Liu HQ, Sulaiman K, Sun Y, Pang Y, Fan XX, Xie R, Liu C, Duan YN, Ma Y (2018). 3-D *in-situ* non-destructive structural characterization of *Ferula sinkiangensis*. *Chin Bull Bot* **53**, 364–371.

---

\* Author for correspondence. E-mail: hqliu@xjmu.edu.cn

(责任编辑: 朱亚娜)