

DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2016.0014

木炭研究方法

孙楠^{1,2}, 李小强²

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所,
中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044

摘要: 木炭作为重要的植物遗存, 是重建植被历史、恢复古气候、探讨早期人类活动的理想材料。准确识别木炭以及获取有代表性的样品是顺利开展研究工作的先决条件; 木炭的定量研究可提高植被类型及其演替历史的研究精度; 而其内部特殊结构组织的观察将提供更为丰富的信息。本文基于近年来国内外最新研究成果, 对木炭的鉴别, 样品的采集、鉴定和统计等进行系统的归纳和总结, 并提出该指标研究过程中仍需解决的一些关键问题。

关键词: 木炭; 第四纪; 考古; 古环境; 方法

中图分类号: Q914.2⁺1; 文献标识码: A; 文章编号: 1000-3193(2016)01-0149-12

Methodology in Fossil Charcoal Analysis

SUN Nan^{1,2}, LI Xiaoqiang²

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054; 2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044

Abstract: Fossil charcoal results from incomplete burning, and retains the anatomic character of the original wood, has distinct advantages and significant potential for reconstructing terrestrial vegetation, paleoclimate and human activity. Nevertheless, fossil charcoal is information rich but yet is an under-utilized resource because of a lack of systematic research method in this discipline. Understanding of how charcoal might be recognized in the field and obtaining representative sample are crucial for the charcoal study; and proper research method will expand the application range of the proxy. Recently, quantitative analysis of fossil charcoal has made

收稿日期: 2014-05-06; 定稿日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41202131 和 41172161)、中央高校基本科研业务费专项资金 (2014G1271059; 2014G3272013); 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA01020304) 和国家重点基础研究发展规划项目 (973 项目) (2010CB950204) 共同资助

作者简介: 孙楠 (1983-), 女, 陕西省西安市人, 讲师, 第四纪地质学专业, E-mail: sunnan@chd.edu.cn

通讯作者: 李小强, 第四纪地质学与环境考古研究, E-mail: lixiaoqiang@ivpp.ac.cn

Citation: Sun N, Li XQ. Methodology in fossil charcoal analysis[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2016, 35(1): 149-160

outstanding achievements in exploring the vegetation type and its succession history; also, the observation of some special construction such as fungi, radial cracks and reflectance within the fossil charcoal can get more information. The aim of this paper is to present the state of the discipline today, systematic review the procedure of fossil charcoal analysis (from identification to statistics analysis), and introduce the method of charcoal recognition and sampling in the field; in addition to this, we point out the questions that remain to be studied.

Key words: Fossil charcoal; Quaternary; Archaeology; Paleoenvironment; Method

1 引言

陆生植被是生态环境的重要组成部分，也是人类利用的重要资源之一。因此，过去陆生植被研究不仅可以重建气候和生态环境变化特征与历史，也有助于理解早期人类活动的特征、方式和强度。孢粉、植硅体和种子等重要植物指标已被广泛用于重建区域植被、气候、生态和人类活动^[1-5]。其中孢粉是植被重建的传统指标，而由于其自身产量、传播及保存等一系列问题的多变性，鉴定精度的局限性，阻碍了古植被研究精度的进一步提升。植硅体在草本植物尤其是禾本科植物研究方面已取得显著成效，成为鉴定和分辨野生稻和栽培稻^[6]，识别和区分粟-黍作物，探讨农业起源与发展的有效手段^[4]。近几年来，木炭（Fossil Charcoal）作为一种重要的植物遗存开始被科学家所关注，该指标在区分木本植物类型方面优势突出，且其鉴定精度可达到属甚至种，成为判别植物类型、恢复植被特征^[7-10]，理解早期人类活动的有效指标和重要途径^[11, 12]。

木炭是碳化作用的直接结果，具有含碳量高，化学性质相对稳定，耐腐蚀，易保存等特征^[13]，在考古遗址中尤其常见，被视为早期人类用火的直接结果。遗址资源域分析（Site Catchment Analysis）发现史前农耕群体的开发领域通常在 5km 或 1 小时步行的半径范围之内^[14]，基于“最省力原则”（Principle of Least Effort），木炭遗存主要来自聚落周边植物，不仅代表先民使用的薪材类型，也直接反映了地方性植被信息^[15, 16]，成为重建地方性植被和早期人类活动的理想材料。

目前，我国木炭的研究尚处于起步和发展阶段，缺少一整套系统的研究手段和方法。本文将基于近年来木炭的研究工作，并结合国际上最新研究成果，对木炭的鉴别，样品的采集、鉴定和统计等进行系统的归纳和总结，以期有助于木炭研究工作的开展和深入。

2 木炭的鉴别及其研究简史

绝大部分木炭都是植物在火作用下不完全燃烧的产物^[17, 18]，由于碳化作用而呈现黑色，常保存在不同地层中。然而，地层中出现的黑色沉积物并不都是木炭，还可能是煤或其它黑色矿物碎屑。对比发现，不同黑色沉积物内部结构及物理特性等具有明显差异，因此，以下要素成为我们正确识别木炭的关键^[19]（图 1）：1）木炭不仅外表颜色为黑色，

其条痕色仍旧是黑色；2) 放大镜下木炭有明显的木材解剖结构特征；3) 经碳化作用的木材性脆易碎，其保存大小一般不超过 2 cm（后期若经历矿化作用，可保存较大体积^[20]）；4) 从断口类型上来看，木炭为锯齿状或粉末状，煤为贝壳状；5) 从光泽度上来看，木炭的光泽度不如煤或其它矿物高。

为方便研究，一般将小颗粒的碳化植物碎片称为炭屑（Charcoal, <1 mm），它们主要保存在各类沉积物中，可作为火活动和火历史研究的良好代用指标^[21-23]。通常以 125 μm 为界，大炭屑 (>125 μm)

主要反映地方性火活动，小炭屑 (<125 μm) 则主要反映区域性火活动^[24, 25]。

本文所涉及的木炭（Fossil Charcoal）特指颗粒较大 (>1mm)，在镜下可清楚观察其内部组织结构的碳化植物遗存。这种植物遗存早在 1864 年就引起了意大利科学家 G. Passerini 的关注，随后瑞士科学家 O. Heer 在新石器时代和铜器时代的遗址中均发现了木炭遗存。直到 20 世纪初，法国科学家 H. Breuil 才首次对木炭进行了分析^[26]。上世纪四十年代以来，木炭研究全面展开^[27-33]，并随着反射光显微镜的引入而得到快速发展^[34-40]。到八十年代初，木炭已开始较广泛应用于考古学研究中，并在九十年代形成一套较为完整的方法论^[41-48]。与此同时，科学家也一直在探讨木炭在古生态研究中的意义^[49]。本世纪以来木炭研究已步入系统化，成为考古、古环境、地质等领域的一个重要指标。后文将就目前广泛采用的木炭研究方法进行介绍。

3 样品采集与统计

地层中木炭的获取一般采用浮选法^[50]，该方法的使用将极大提高样品获取的数量和质量，从而可使我们对当地木本植物种属及植被类型的认识更加准确^[51]。首先，对取样点地层进行分层，每层采用 20 升标准袋获取足量样品，选择 60 目的筛网借助流水作用将土滤净，随后将筛网上的残余物全部装入样品袋，带回实验室进行进一步挑选，将其中的木炭、种子、动物遗存等分别收集。另外，考古发掘中，针对不同的考古单元（如房址、炉膛、墓葬等）也可专门拣选有代表性的木炭，便于讨论先民对木材的选择性利用。

早期木炭研究多是定性分析，仅体现了研究区所出现的木本植物种属，而缺少量的概念，因此，难以从中判定优势种、建群种等群落特征，无法还原植被类型及其演替历史，使木炭指标的应用受到极大限制。同时，埋藏于地层中的木炭容易受到沉积后作用（post deposition）的影响而发生破碎，并在样品浮选的过程中进一步破碎，使我们难以确定各种木炭的原始含量。

为了解决木炭量化研究的问题，学者做了大量探讨，目前普遍认为当木材转化为木炭，

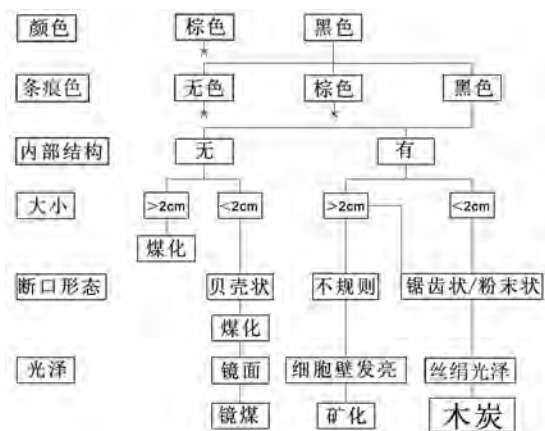


图 1 木炭鉴别要点 (据参考文献 [19])

Fig.1 Scheme for the identification of charcoal^[19]

不同种属木炭的物理化学性质均较相似，在相同环境条件下破裂的程度基本一致，那么某种属的碎块在地层中的含量就与该种属本身含量具有直接关系^[46]。因此，对木炭碎块进行统计分析可以了解木炭组合特征，进而查明群落特征、恢复植被历史。

目前，“百分含量”和“频度”是木炭量化统计中普遍使用的两个指标，其中“百分含量”是指一个样品中某种木炭数量与木炭总量的百分比值；“频度”是指某种木炭在不同样品中出现的次数与样品总数的百分比值。根据不同种属木炭“百分含量”的变化绘制图谱（利用 Tilia 或 C2 软件制图），便可直观的呈现木炭组合及其变化特征。

为了获取较为完整的植被组成信息，我们往往需要鉴定尽可能多的木炭数目。当样品数量较大，为了提高工作效率，就需要寻求一种合理的统计方法。研究发现，木炭的类型及其百分含量随鉴定数目的增多而变化，当鉴定数增多到一定量时，不再有新的类型出现，同时不同类型的百分比也趋于稳定^[52, 53]，这种木炭类型变化趋势线即为饱和曲线，达到饱和时的木炭数目为该样品的理想鉴定数目。不同气候环境及地形地貌条件下所对应的植被类型各异，其种属丰富度也有所差别，因此，难以用统一标准确定木炭样品鉴定数目的下限。Keepax 建议温带地区一个样品的木炭鉴定数应不少于 100 块^[52]；而 Chabal 等认为一个样品应至少鉴定 250 块木炭，400-500 块最为理想^[54]。

黄土高原西部天水盆地大地湾遗址木炭研究显示^[55]（图 2），当统计的木炭数目小于 20 块时，出现的种属数目随着所统计木炭数目的增多而呈线性快速增长，当木炭统计数目达到 40 块时，出现的种属占所有种属的一半以上，随后新增种属个数增长速度变缓，木炭统计数目达到 80 块后，新增种属增长速度十分缓慢，当木炭统计数目达到 110 块后，无新增种属出现。天水盆地处于暖温带季风区，因此，我国北方温带地区选取不少于 100 块木炭进行鉴定，基本可以满足统计要求。当然，不同气候环境特征和植被类型地区应对应不同的木炭饱和曲线，南方植被类型丰富的地区，所需统计的木炭数目可能应适当提高。

考虑到一些灌木或乔木幼枝产生的木炭较乔木树干的小，在统计分析过程中若仅选取大小相近的木炭会在解释该组合的过程中产生偏差^[56]，因此，为了所统计的木炭组合更具代表性，在选取木炭鉴定时可随机分出一部分样品并对其中的木炭全面分析^[57]，或在鉴定过程中有意选择不同大小及形状的木炭^[58]，另外也可用不同孔径的筛网将样品分成不同粒级，并在每个粒级中随机选取木炭进行鉴定^[59, 60]。

木炭本身是良好的 AMS¹⁴C 测年材料，木炭的 ¹⁴C 年龄具有很高的可信度。考虑到一些乔木的生长时间较长，可达几十年甚至上百年，而树木幼枝或者小灌木一般生长时间较短，因此，为提高木炭样品测年的精度，应尽量选取幼枝部分或小灌木这些生长时间较短的木材^[61]。对于大多数木材而言，生长时间越短木材的

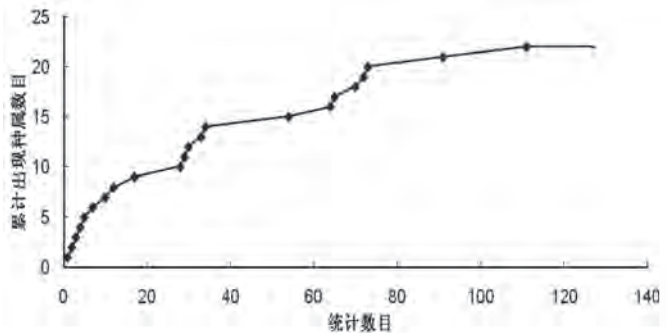


图 2 大地湾木炭饱和曲线图

Fig.2 Identification saturation curve of fossil charcoal from the Dadiwan site

直径越小，而木材原始直径大小可通过木炭横切面生长轮的曲率进行判断^[62-64]。显微镜下观察可发现木材直径与曲率变化成反比（图3），幼枝生长轮的曲率较大，而树干或生长多年的树枝生长轮曲率较小甚至较为平直^[65]。因此，镜下统计样品的过程中，应仔细观察木炭生长轮的特点，以便选取合适的测年样品。

值得注意的是，灰坑或文化层中的木炭多来源于先民所用薪材，以树枝为主，因此样品曲率越大表明树枝越细小，也相对更加年轻。而房址中的木炭则多为建筑用材，以多年生长的大树树干为主，木炭可能来源于树干中心到外部的任一部位。由于树木生长轮是由位于韧皮部和木质部之间的形成层周期性生长的结果，因此最外部的生长轮最年轻。树干生长轮的曲率由内向外逐渐减小，那么最外部生长轮的曲率也最小，此时选取曲率最小的样品测年将更具代表性。

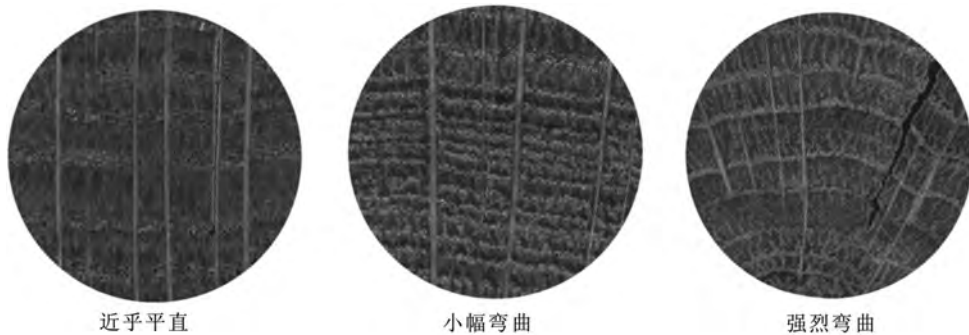


图3生长轮曲率示意图^[65]

Fig.3 Test card for evaluation of tree-ring curvature^[65]

4 木炭种属的鉴定方法

木炭种属的鉴定是以现生木材解剖特征为重要依据，按照木材鉴定方法完成。首先将木炭样品手工切出横切面、径切面、弦切面三个新鲜面^[40]，在体视显微镜下观察三个切面特征^[66,67]（图4），将特征表现一致的样品归为一类，然后将不同类型的木炭样品分别选取1-2个，在扫描电子显微镜（SEM）下进一步拍照并观察，对比现代木材标本与图版确定种属。

木炭鉴定的顺序一般从横切面开始，主要观察木材的生长轮、树脂道（针叶材）、树胶道（阔叶材）、管孔、薄壁组织、木射线等结构的形态及其组合特征，确定其所属科等大类；然后在径切面上观察管胞、导管与射线细胞的形态特征及其上所出现的附属结构（纹孔、加厚等），导管穿孔形式，射线与导管（管胞）交叉区纹孔式等；最后结合弦切面上木射线特征（宽度、高度、数量、叠生等）最终确定种属。

木炭的解剖结构可以带给我们种属的信息，除此之外，一些特殊结构组织的出现可提供更多的关于人类活动的信息，对生物考古研究具有十分重要的意义，而以往的研究由于经验的缺乏可能会对这些特征“视而不见”。另外，考古木炭材料的稀缺性和有限性等也要求我们尽可能在较少的样品中挖掘最多的信息。因此，木炭的以下特征也有必要进行细致的观察和认真分析。

菌丝 (Fungi) 鉴定木炭的过程中可能会观察到一些菌丝 (图 5)，根据菌丝出现的部位可帮助我们判断木材在转变成木炭之前的生理状况。若菌丝附着在木炭表面，表明其出现于木炭形成之后，也说明原始木材是健康的；若菌丝出现在木炭内部，则代表木材在燃烧之前已经腐朽^[68]。这一特征对于探讨考古遗址中新材的来源十分有效。已有研究发现，考古遗址中的木炭内部常见到菌丝，表明先民生活用火的木材大多来源于枯木^[69, 70]；而当一个遗址被长期占据，枯木不足以维持日常生活时，先民会砍伐周边树木作为薪材^[16]，

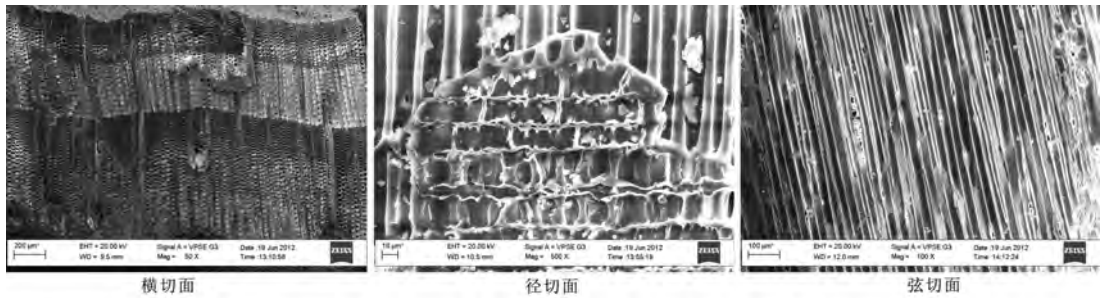
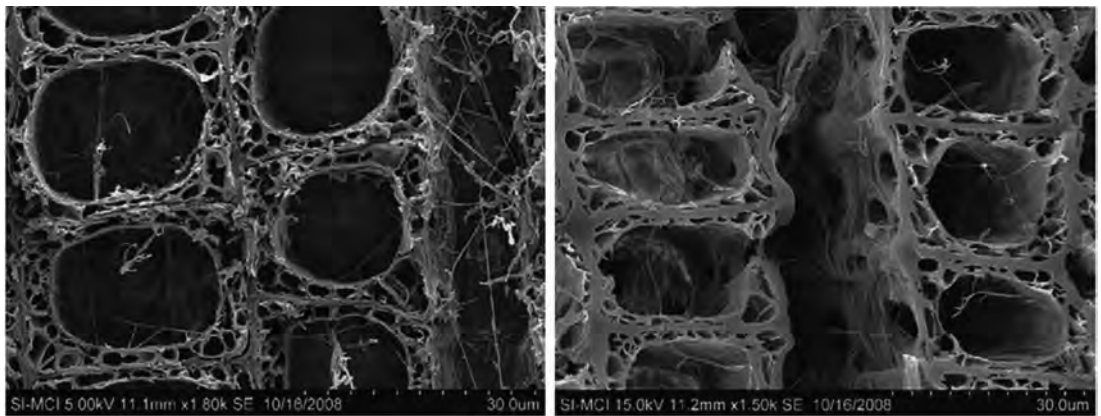
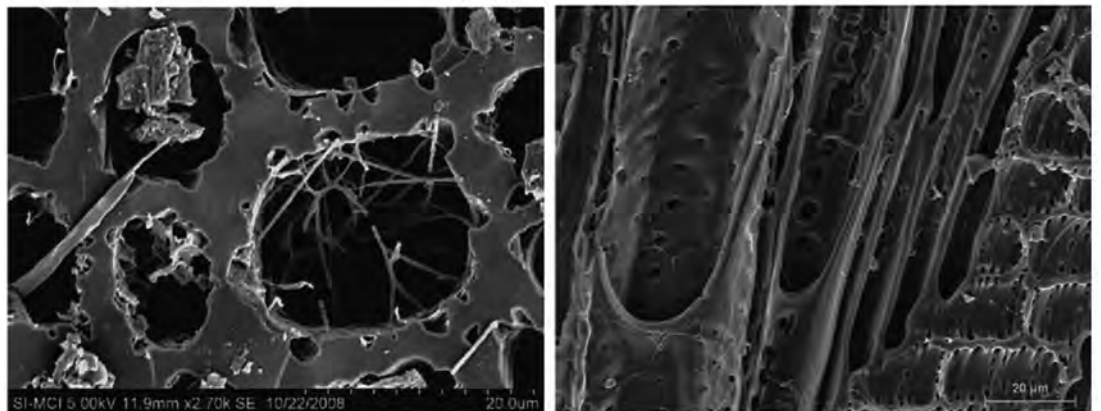


图 4 木炭三个切面

Fig.4 The transverse, radial and tangential sections of fossil charcoal



木材 木炭



考古遗址中的木炭

图 5 木材与木炭中的菌丝^[68]

Fig.5 Wood and charcoal fragments with fungi^[68]

这种情况下木炭内部出现菌丝的几率将会减少，进一步证明了“最省力原则”的合理性。

径向裂纹 (Radial cracks) 裂纹是木炭表面的常见现象，它的形成与原始木材的含水量具有密切关系。一般来讲，新鲜木材比干木材含水量高，当其中水分减少后木材各组织会发生不同程度的收缩，而高温条件下的碳化作用会放大这一现象，据统计，木材纵向收缩幅度在 6.5-24% 之间，而横向则可达 12%-35%^[71-74]，因此，由新鲜木材形成的木炭表面会出现大量径向裂纹^[75-77]。

干木材在碳化过程中，由于其内部残留结合水的蒸发^[78,79]，或木质素的塑性流变^[47]也会出现裂纹。与新鲜木材相比，二者所产生径向裂纹的大小和数量明显不同。经碳化作用的新鲜木材表面裂纹通常小而密集，干木材的裂纹则大且稀疏^[80]（图 6），该特征是我

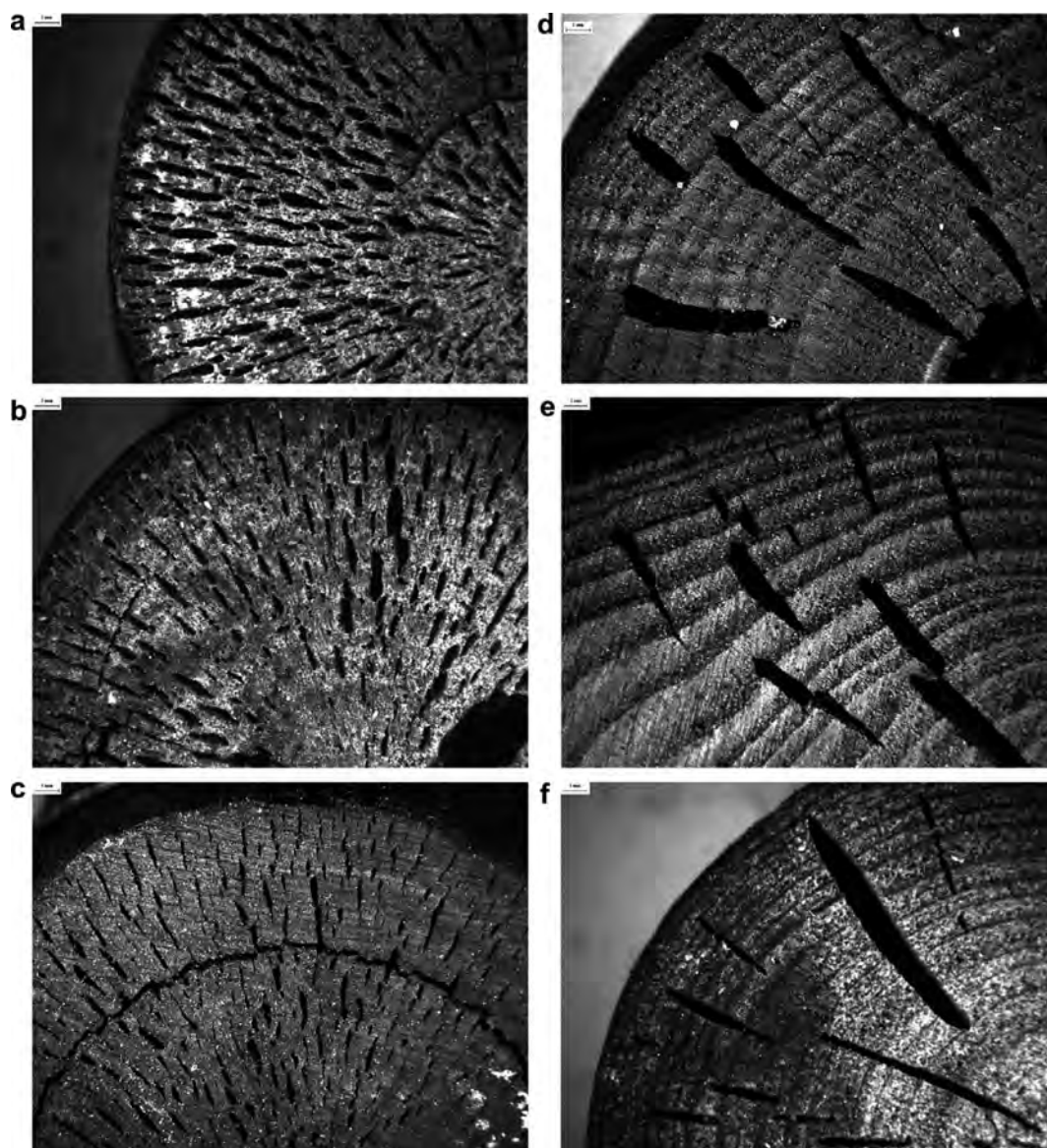


图 6 新鲜木材 (a、b、c) 和干木材 (d、e、f) 径向裂纹对比
Fig.6 The radial cracks on the green wood (a, b, c) and the seasoned wood (d, e, f)^[80]

们判别先民选择新鲜木材或干木材作为薪材的一个重要标准, 据此, 可进一步探讨人类活动对周边环境影响。若遗址中木炭多来源于新鲜木材, 我们基本可以确定地面枯木已经不能满足先民的生活需要, 人类开始对遗址周边植物进行砍伐。通过地层中木炭种属组合及木炭表面径向裂纹特征随时间的变化, 可解读人类对环境影响的方式与强度。

反射率 (Reflectance) 目前, 反射率也成为木炭鉴定的一个重要参数。实验发现木材碳化过程中反射率随着温度的升高而增加^[13,73,81], 当温度恒定时, 反射率随着时间的积累也会有所增加^[81-83], 但在 4-5 个小时以后会趋于稳定, 不再变化。因此, 可通过测定木炭的反射率来确定木材的燃烧温度^[56, 83]。

人类活动遗址中, 木材燃烧温度的确定将为我们进一步探讨薪材的用途、区分早期人类活动属性给予更多证据。比如, 一般用于日常生活的燃烧温度在 300°C-800°C 之间^[81], 而用于工业生产如烧制陶器和金属冶炼等活动的燃烧温度则大于 800°C^[84]。需要注意的是在相同温度条件下, 被子植物的反射率比裸子植物高^[73], 因此, 在应用该参数时应首先确定植物种属。

早期地层中的木炭及炭屑浓度常被用于研究火活动历史, 而木炭能否完好保存于地层中在很大程度上受到木材燃烧温度的影响。一般情况下形成于 300°C 以下的木炭在地层中容易发生降解而导致浓度降低, 形成于 400°C 以上的木炭在地层中易保存。这一特点表明, 如果仅以地层中木炭含量来判断火活动的强弱, 将可能造成误差^[85], 测定木炭反射率可以对数据解释给予更多证据。

5 综述与展望

5.1 研究综述

目前, 木炭已成为地质学和考古学领域的一个重要指标, 有着一整套系统的研究手段和方法(图 7)。野外采样可使用浮选法和挑选法两种方法进行, 随后在实验室进一步分选, 获得研究样品; 通过木炭饱和曲线研究确定样品用量; 根据现代木材鉴定方法确定木炭种属, 绘制木炭图谱, 重建古植被及其演化特征, 并探讨其与古气候和人类活动的关系; 观察木炭内部菌丝、径向裂纹及反射率等特征, 结合木炭组合及其变化特征探讨早期人类对木材的利用。

在木炭实际研究过程中, 需首先明确研究目的, 然后选择研究地点、材料和方法。在进行古植被、古气候和人类活动研究时, 一般选取包含人类长期活动遗存的文化层, 采用浮选法获得木炭样品, 尽量避免和减小由于“人类选择使用木材”对木炭种属组合的影响。在研究早期人类对木材的选择性利用时, 可针对考古遗址中不同功能单元(房址、炉膛、墓葬等)选择样品, 这些木材或木炭遗存可直观反映先民在不同活动中的木材使用状况。除此以外, 尽可能提取木炭中的菌丝、表面裂纹以及反射率等其它反映人类活动的信息。

5.2 未来工作方向

根据我国木炭研究现状, 未来可重点开展以下几方面研究工作:

1) 针对木炭本身易破碎的特点, 未来需要研究不同种属木炭在形成温度、埋藏环境各异条件下以及木炭样品浮选过程中发生破碎的程度, 查明由于木炭破裂程度的差异而导致的超代表性、低代表性种属, 减少解读木炭组合特征以及定量重建研究过程中可能产生的误差。

2) 木炭鉴定过程中, 需特别关注菌丝、径向裂纹、驻洞、生长轮以及玻化现象等树木学 (dendrology) 方面的特征, 这些信息可以帮助我们理解先民对薪材的选择策略。其中生长轮曲率的研究能在一定程度上还原木材直径大小, 然而其准确性仍有待在今后研究中加以提高^[86]。

3) 近年来, 木炭稳定碳同位素记录被作为一种新方法定量重建古气候和古环境^[87, 88]。由于不同种属植物有着不同的生态习性, 其碳同位素值也存在很大差异, 因此, 碳同位素方法的使用要求木炭的鉴定精度达到种一级。另外, 木炭形成过程中的燃烧温度也会极大地影响木炭稳定碳同位素组成^[89]。所以, 查明现生植物碳同位素组成与气候环境之间的关系, 剔除燃烧温度效应对木炭同位素的影响, 成为提高古气候和古环境定量重建精度的基础。

参考文献

- [1] Underhill A. Current issues in Chinese Neolithic archaeology[J]. Journal of World Prehistory, 1997, 11: 103-60
- [2] Kennett DJ, Kennett JP, Erlanson JM, et al. Human responses to Middle Holocene climate change on California's Channel Islands[J]. Quaternary Science Review, 2007, 26:351-367
- [3] Li XQ, Dodson J, Zhou XY, et al. Early cultivated wheat and broadening of agriculture in Neolithic China[J]. The Holocene, 2007, 17: 555-560
- [4] Lu HY, Zhang JP, Liu KB, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago[J]. PNAS, 2009, 106(18): 7367-7372
- [5] Velichko AA, Kurenkova EI, Dolukhanov PM. Human socio-economic adaptation to environment in Late Palaeolithic, Mesolithic and Neolithic Eastern Europe[J]. Quaternary International, 2009, 203: 1-9
- [6] Pearsall DM, Piperno DR, Dinan EH, et al. Distinguishing rice (*Oryza sativa* Poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis: results of preliminary research[J]. Economic Botany, 1995, 49(2): 183-196
- [7] Li XQ, Sun N, Dodson J, et al. Vegetation characteristics in the western Loess plateau between 5200 and 4300 cal BP based on fossil charcoal records. Vegetation History and Archaeobotany[J], 2013, 22: 61-70
- [8] Sun N, Li XQ, Dodson J, et al. Plant diversity of the Tianshui Basin in the western Loess Plateau during the mid-Holocene Charcoal records from archaeological sites[J]. Quaternary International, 2013, 308: 27-35

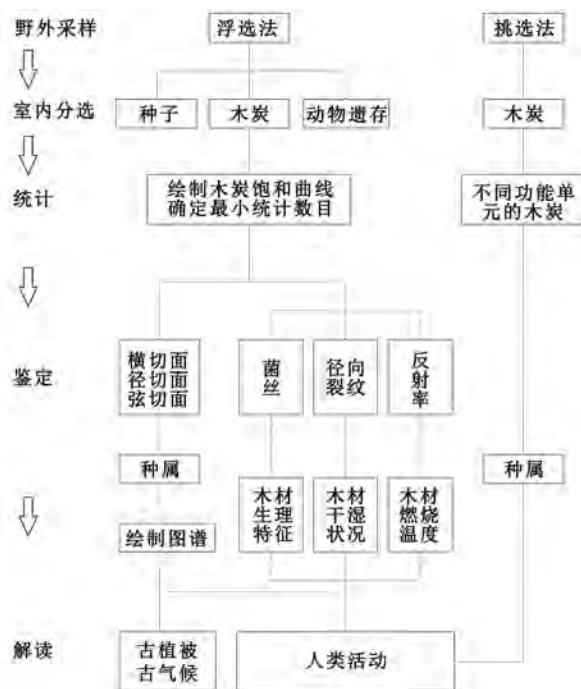


图7 木炭基本研究步骤

Fig.7 Scheme for the fossil charcoal research

- [9] 崔海亭, 李宜垠, 胡金明, 等. 利用炭屑显微结构复原青铜时代的植被 [J]. 科学通报, 2002, 47(19): 1504-1507
- [10] 孙楠, 李小强, 尚雪, 等. 黄土高原南部下河遗址全新世中期的植被与气候: 基于木炭化石记录 [J]. 第四纪研究, 2014, 34(1): 27-34
- [11] Li XQ, Sun N, Dodson J, et al. Human activity and its impact on the landscape at the Xishanping site in the western Loess Plateau during 4800-4300 calyr BP based on the fossil charcoal record[J]. Journal of Archaeological Science, 2012, 39: 3141-3147
- [12] 孙楠, 李小强, 周新郢, 等. 甘肃河西走廊早期冶炼活动及影响的炭屑化石记录 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(2): 319-325
- [13] Scott AC, Glasspool IJ. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70: 55-66
- [14] Renfrew C, Bahn P. Archaeology Theories, Methods and Practice[M]. London: Thames and Hudson Ltd, 1991, 224-225
- [15] Scheel-Ybert R. Vegetation stability in the Southeastern Brazilian coastal area from 5500 to 1400 14 C yr BP deduced from charcoal analysis[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2000, 110: 111-138
- [16] Shackelton C, Prins A. Charcoal analysis and the principle of Least Effort "a conceptual model" [J]. Journal of Archaeological Science, 1992, 19: 661-637
- [17] Kuhlbusch TAJ, Crutzen PJ. Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide [A]. In: Levine JS ed. Biomass Burning and Global Change. Remote Sensing, Modelling and Inventory Development and Biomass Burning in Africa, vol. 1[C]. Cambridge Massachusetts: MIT Press, 1996, 160-169
- [18] Schmidt MWI, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14: 777-793
- [19] Scott AC. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironment analysis[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 291: 11-39
- [20] De Lafontaine G, Couillard PL, Payette S. Permineralization process promotes preservation of Holocene macrofossil charcoal in soils[J]. Journal of Quaternary Science, 2011, 26(6): 571-575
- [21] Smith DM, Griffin JJ, Goldberg ED. Elemental carbon in marine sediments: a baseline for burning[J]. Nature, 1973, 241: 268-270
- [22] Power MJ, Marlon J, Ortiz N, et al. Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data[J]. Climate Dynamics, 2008, 30: 887-907
- [23] Marlon JR, Bartlein, PJ, Walsh MK, et al. Wildfire responses to abrupt climate change in North America[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106: 2519-2524
- [24] Clark JS. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling[J]. Quaternary research, 1988, 30: 67-80
- [25] 李小强, 周新郢, 尚雪, 等. 黄土炭屑分级统计方法及其在火演化研究中的意义 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(05): 540-544
- [26] Asouti E, Fuller DQ. Trees and Woodlands in South India: Archaeological Perspectives[M]. Walnut Creek: Left Coast Press, 2008
- [27] Salysbury KJ, Jane FW. Charcoal from maiden Castle and their significance in relation to the vegetation and climatic conditions in Prehistoric times[J]. Journal of Ecology, 1940, 28: 310-325
- [28] Godwin H, Tansley AG. Prehistoric charcoals as evidence of former vegetation, soil and climate[J]. Journal of Ecology, 1941, 29 (1): 117-126
- [29] Balout L. A propos des charbons de bois préhistoriques[J]. B.S.H.N. de l'Afrique du nord, 1952, 43: 160-163
- [30] Santa S. Essai de reconstitution des paysages végétaux quaternaires d'Afrique de Nord[J]. Libyca, 1961, 6-7: 37-77
- [31] Couvert M. Etude des charbons préhistoriques. Méthode de préparation et d'identification[J]. Libyca, 1968, 16: 249-256
- [32] Couvert M. Étude de quelques charbons préhistoriques de la grotte Capelleti[J]. Libyca, 1969, 17: 213-218
- [33] Couvert M. Identification de charbons provenant du gisement de Tamar Hat[J]. Libyca, 1969, 17: 49-52
- [34] Western AC, Brothwell D, Higgs E, et al. Wood and charcoal in archaeology. Science in archaeology: a comprehensive survey of Progress and Research[C]. New York: Thames & Hudson, 1963, 150-158
- [35] Western AC. The ecological interpretation of ancient charcoals from Jericho[J]. Levant, 1971, 3: 31-40
- [36] Stieber J. A Magyarországi Felsőpleisztocén vegetáció-története az anthrakotómiai eredmények (1957 IG) Tükrében[J]. Földtani Közlöny, 1967, 97 (3): 308-317
- [37] Stieber J. A Hasai Későglacialis Vegetációtörténet Anthrakotómiai vizsgálatok A-lapján[J]. Földtani Közlöny, 1969, 98 (2): 188-193
- [38] Vernet J-L. Nouvelle contribution à l'histoire de la végétation holocène des Grands Causses d'après les charbons de bois[J]. Bulletin della Società Á botanica France, 1972, 119: 169-184
- [39] Vernet J-L. Etude sur l'histoire de la végétation du sud-est de la France au Quaternaire, d'après les charbons de bois principalement[J]. Paléobiologie Continentale, Montpellier, 1973, 4(1): 1-90

- [40] Leney L, Casteel RW. Simplified procedure for examining charcoal specimens for identification[J]. *Journal of archaeological science*, 1975, 2: 153–159
- [41] Thiébault S. Étude critique des aires de combustion en France[D]. Paris : Université de Paris I, 1980
- [42] Chabal L. Méthodes de prélèvement des bois carbonisés proto historiques pour l'étude des relations homme-végétation[D]. Montpellier: DEA Université de Montpellier II, 1982,1-54
- [43] Chabal L. Pourquoi et comment prélever les charbons de bois pour la période antique, les méthodes utilisées sur le site de Lattes (Hérault) [J]. *Lattara*, 1988, 1: 187-222
- [44] Chabal L. L'étude paléocologique des sites protohistoriques à partir des charbons de bois, la question de l'unité de mesure[A]. In: Hackens T, Munaut AV, Till C eds. *Wood and Archaeology*[C]. Louvain la-Neuve: First European conference, PACT 22, 1990, 189 -205
- [45] Chabal L. L'Homme et l'évolution de la végétation méditerranéenne, des âges de métaux à la période romaine: recherches anthracologiques théoriques, appliquées principalement à des sites du Bas-Languedoc[D]. Montpellier: Université de Montpellier II, 1991
- [46] Chabal L. La représentativité paléo-écologique des charbons de bois archéologiques issus du bois de feu [A]. In: Vernet JL ed. *Les charbons de bois les anciens écosystèmes et le rôle de l'Homme*[C]. Paris: *Bulletin de la Société Botanique de France*, 1992, 139: 213-236
- [47] Chabal L. Apports récents de l'anthracologie à la connaissance des paysages passés: performances et limites[D]. *Histoire et Mesure*, 1994, 11 (3/4): 317 -338
- [48] Vernet J-L. Les charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme. Coll. Montpellier, septembre 1991[C]. Paris: *Bulletin de la Société Botanique de France, Actualités botaniques*, 1992, 1-725
- [49] Chabal L. Forêts et sociétés en Languedoc (Néolithique final, Antiquité tardive). *L'anthracologie, méthode et paléoécologie*[M]. Paris: Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, 1997, 63
- [50] Tsuyuzaki S. Rapid seed extraction from soils by a flotation method[J]. *Weed Research*, 1994, 34: 433- 436
- [51] Jansen D, Nelle O. The Neolithic woodland – archaeoanthracology of six Funnel Beaker sites in the lowlands of Germany[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, doi:10.1016/j.jas.2012.10.024
- [52] Keepax CA. Charcoal analysis with particular reference to archaeological sites in Britain[D]. London: University of London, 1988
- [53] Smart TL, Hoffman ES. Environmental interpretation of archaeological charcoal[A]. In: Hastorf CA, Popper VS eds. *Current Paleoethnobotany*[C]. Chicago and London: University of Chicago Press., 1988, 165-205
- [54] Chabal L, Fabre L, Terral JF, et al. “L'anthracologie,”[A]. In: Bourquin-Mignot C, Brochier JE, Chabal L, et al. eds. *La Botanique*[C]. Paris: Errance, 1999, 43-104
- [55] Sun N, Li XQ. The quantitative reconstruction of the palaeoclimate between 5200 and 4300 calyr BP in the Tianshui Basin, NW China[J]. *Climate of the Past*, 2012, 8: 625-636
- [56] Scott AC. The pre-quatarnary history of fire[J]. *Palaeogeography, Palaeo-climatology, Palaeoecology*, 2000, 164: 281–329
- [57] Willcox G. A history of deforestation as indicated by charcoal analysis of four sites in eastern Anatolia[J]. *Anatolian Studies*, 1974, 24: 117-133
- [58] Miller NF. Palaeoethnobotanical evidence for deforestation in ancient Iran: A case study of urban Malyan[J]. *Journal of Ethnobiology*, 1985, 5: 1-19
- [59] Zalucha LA. Methodology in palaeoethnobotany: A study in vegetational reconstruction dealing with the Mill Creek culture of northwestern Iowa[D]. Madison: University of Wisconsin, 1982
- [60] Asouti E. Woodland vegetation and fuel exploitation at the prehistoric campsite of Pınarbaşı, south-central Anatolia, Turkey: the evidence from the wood charcoal macro-remains[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2003, 30: 1185-1201
- [61] Gavin DG. Estimation of inbuilt age in radiocarbon ages of soilcharcoal for fire history studies[J]. *Radiocarbon*, 2001, 43: 27–44
- [62] Dufraisse A. Les habitats littoraux néolithiques des lacs de Chalain et Clairvaux (Jura, France): collecte du bois de feu, gestion de l'espace forestier et impact sur le couvert arboréen entre 3700 et 2500 av. J.-C., analyses anthracologiques[D]. Besançon: Université de Franche-Comté, 2002
- [63] Ludemann T, Nelle O. Die Wälder am Schauinsland und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei[M]. Freiburg: Freiburger Forstliche Forschung, 2002,15:139
- [64] Nelle O. Charcoal burning remains and forest stand structure—examples from the Black Forest (south-west Germany) and the Bavarian Forest (south-east Germany)[A]. In: Thiébault S ed. *Charcoal analysis. Methodological approaches, palaeoecological results and wood uses. Proceedings 2nd international meeting of anthracology, Paris (BAR InternatSer 1063) [C]. Oxford: Archaeopress, 2002, 201–207*

- [65] Marguerie D, Hunot JY. Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34: 1417-1433
- [66] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985
- [67] 腰希申. 中国主要木材构造 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1988
- [68] Moskal-del Hoyo M, Wachowiak M, Blanchette RA. Preservation of fungi in archaeological charcoal[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37: 2106-2116
- [69] Théry-Parisot I. Économie du combustible au Paléolithique. Anthracologie, Expérimentation, Taphonomie[M]. *Dossier de Documentation Archéologique*, 20. Paris: CNRS, 2001, 1-200
- [70] Théry-Parisot I, Texier PJ. L'utilisation du bois mort dans le site moustérien de la Combette (Vaucluse). Apport d'une approche morphométrique des charbons de bois à la définition des fonctions de site, au Paléolithique[J]. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 2006, 103 (3): 453-463
- [71] Mac Ginnes EA, Kandel SA, Szopa PS. Some structural changes observed in the structure of wood[J]. *Wood and Fiber Science*, 1971, 3 (2): 77-83
- [72] Beall FC, Blankenhorn PR, Moore GR. Carbonized wood-physical properties and use as a SEM preparation[J]. *Wood and Science*, 1974, 6(3): 212-219
- [73] Braadbaart F, Poole I. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35 (9): 2434-2445
- [74] McParland LC, Collinson ME, Scott AC, et al. Is vitrification in charcoal a result of high temperature burning of wood[J]? *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37 (10): 2679-2687
- [75] Zicherman JB, Williamson RB. Microstructure of wood char[J]. *Wood Science and Technology*, 1981, 15: 237-249
- [76] McParland LC, Collinson ME, Scott AC, et al. Ferns and fires: experimental charring of ferns compared to wood and implications for palaeobiology, palaeoecology, coal petrology, and isotope geochemistry[J]. *PALAIOS*, 2007, 22 (5): 528-538
- [77] Pastor-Villegas J, Meneses Rodríguez JM, Pastor-Valle JF, et al. Changes in commercial wood charcoal by thermal treatments[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 80 (2): 507-514
- [78] Avat F. Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois (20°C-300°C): Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques[D]. Saint-Étienne: École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 1993, 1-237
- [79] Thuvander F, Berglung LA. In situ observations of fracture mechanisms for radial cracks in wood[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35: 6277-6283
- [80] Théry-Parisot I, Henry A. Seasoned or green? Radial cracks analysis as a method for identifying the use of green wood as fuel in archaeological charcoal[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39: 381-388
- [81] McParland LC, Scott AC, Collinson ME, et al. The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2009, 1: 249-261
- [82] Guo Y, Bustin RM. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 37: 29-53
- [83] Scott AC, Glasspool IJ. Charcoal reflectance as a proxy for the emplacement temperature of pyroclastic flow deposits[J]. *Geology*, 2005, 33: 589-592
- [84] Livingstone-Smith A. Bonfire II: the return of pottery firing temperature[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28: 991-1003
- [85] Ascough PL, Bird MI, Scott AC, et al. Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37: 1590-1599
- [86] Théry-Parisot I, Dufraisse A, Chrzazvvez J, et al. Charcoal analysis and wood diameter: inductive and deductive methodological approaches for the study of firewood collecting practices[A]. 5th International Meeting of Charcoal Analysis: Charcoal as Cultural and Biological Heritage[C]; SAGVNTVM Extra, 2011, 11: 31-32
- [87] Ferrio JP, Alonso N, López J, et al. Carbon isotope composition of fossil charcoal reveals aridity changes in the NW Mediterranean Basin[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1253-1266
- [88] Aguilera M, Espinar C, Ferrio JP, et al. A map of autumn precipitation for the third millennium BP in the Eastern Iberian Peninsula from charcoal carbon isotopes[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 102: 157-165
- [89] Hall G, Woodborne S, Scholes M. Stable carbon isotope ratios from archaeological charcoal as palaeoenvironmental indicators[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 384-400.