



北京延庆硅化木的矿物学特征分析

程素珍

北京市地质灾害防治研究所, 北京 100120

摘 要: 通过 X 射线荧光、红外光谱和 X 射线衍射等检测方法分析了延庆硅化木的矿物学特征。结果表明: 2 个不同植物种属但在同一埋藏地形成硅化木标本成因相似, 其颜色与所含元素种类及含量密切相关。X 射线衍射分析表明, 不同颜色和植物种属的硅化木主要组成物相一致, 为 SiO_2 , 其他矿物极其微量。2 个硅化木标本的红外吸收谱带基本一致, 均显示典型的石英质玉石红外吸收光谱, 且含有少量吸附水。偏光显微镜下显示 2 个硅化木标本的主要矿物成分均为隐晶质石英。延庆土城子组硅化木的沉积环境为较浅的湖沼沉积, 当时处于半干旱-半湿润的气候条件下, 并伴随火山活动。

关键词: 硅化木; 矿物特征; X 射线荧光; 红外吸收光谱; X 射线衍射; 北京延庆

MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF SILICIFIED WOOD IN YANQING DISTRICT OF BEIJING

CHENG Su-zhen

Beijing Institute of Geological Hazard Prevention, Beijing 100120, China

Abstract: The mineralogical characteristics of silicified wood in Yanqing are analyzed by the test methods of X-ray fluorescence (XRF), infrared spectroscopy (IR) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the samples of silicified wood of two different plant species but formed in the same burial site are of similar origin, and their colors are closely related to the types and contents of elements in the silicified wood. The XRD analysis indicates that the main compositions of silicified wood with different colors and plant species are consistent, i.e. SiO_2 , with small traces of other minerals. The infrared absorption bands of the two silicified wood specimens are basically the same, showing typical quartzite jade infrared absorption spectrum and containing a small amount of adsorbed water. The main mineral composition of the two specimens are cryptocrystalline quartz under the polarized microscope. The sedimentary environment of silicified wood in Tuchengzi Formation of Yanqing was shallow lacustrine deposit in semiarid-semihumid climate, accompanied by volcanic activity.

Key words: silicified wood; mineralogy; XRF; infrared adsorption spectrum; X-ray diffraction; Yanqing District of Beijing

0 前言

硅化木是树木因地质作用而被埋入地下, 由于与

空气隔绝, 木质不易腐烂, 在漫长的地质作用过程中被

二氧化硅交代而保留了木质的纤维结构和树干外形的

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2021-10-19. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“华北地区重要地质遗迹调查(北京)”(编号 1212011220044); 北京市国土局项目“北京市地质遗迹详查评价及保护对策研究”(编号 0747-1361SITCN217).

作者简介: 程素珍(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 从事古生物化石等地质遗迹保护研究和地质灾害防治工作, 通信地址 北京市通州区潞城镇朗清园二区 6 号楼 1 单元 403, E-mail//78413450@qq.com

化石^[1]。硅化木不仅为古地理、古环境、古气候、古生态的研究提供了重要信息^[2-6],而且因其硅化、玉化和玛瑙化程度各异,色泽丰富已成为天然宝石而被加工开发利用^[7]。北京延庆地区拥有原地埋藏较为集中、保存条件较好的硅化木群,是研究北京及华北地区古植物、古气候和古地理环境的重要载体。前人^[8-9]对延庆硅化木的研究仅停留在种属方面,尚未发现延庆硅化木相关的化学元素和矿物组成的深入研究。现代分析测试技术的飞速发展,为硅化木化学元素、矿物组成的研究提供了可能^[10-18]。作者利用X射线荧光分析法(XRF)、红外光谱法(FT-IR)、X射线衍射仪法(XRD)和偏光显微镜对北京延庆硅化木标本进行了分析研究,以为延庆地区硅化木研究和保护工作提供基础数据资料和理论依据。

1 实验部分

1.1 样品

文中用于测验的2个硅化木标本(DYSYQGHM-1和DYSYQGHM-2)均采于北京延庆地区,产出层位为下侏罗统土城子组。其中,标本DYSYQGHM-1(下文称标本1)大小约为4 cm × 3 cm × 2 cm,为较粗大树干残块,仅保存有次生木质部,未见髓及初生木质部,整体呈土黄色,木质纹理清晰(图1a);经切片分析,当

前标本横切面具清晰的生长轮(图1b),径切面管胞径壁纹孔为异木型,交叉场纹孔为窗格型(图1c、d),因此在分类上应归入异木属(*Xenoxylon* Gothan)。标本DYSYQGHM-2(下文称标本2)大小约为3 cm × 2 cm × 1 cm,为较细树干残块(图1e),整体呈褐红色,木质纹理清晰,仅保存有次生木质部,未见髓及初生木质部;经切片分析,当前标本横切面具清晰的生长轮(图1f),径切面管胞径壁纹孔为混合型(图1g),交叉场纹孔为南洋杉型(图1h),因此在分类上应归入短木属(*Brachyoxylon* Hollick and Jeffrey)。

1.2 仪器及参数

1) X射线荧光分析(XRF)采用日本理学公司波长色散X射线荧光光谱仪(B-U)ZSX Primus II进行光谱分析。测试参数为:真空光路,与样品直径对应准直器面罩20 mm,测量顺序以先测量高能量谱线,步长0.02°,时间0.2 S,速度6°/min。元素分析采用UQ软件进行半定量分析。

2) X射线衍射(XRD)分析采用日本理学公司D/MAX-RA型衍射仪,测试条件:Cu靶,电压40 kV,电流40 mA,扫描角度2θ在3~70°,步长为0.02°,扫描速度10°/min。

3)红外光谱(FTIR)分析采用天津港东科技发展有限公司FTIR-650型傅里叶变换红外光谱仪,

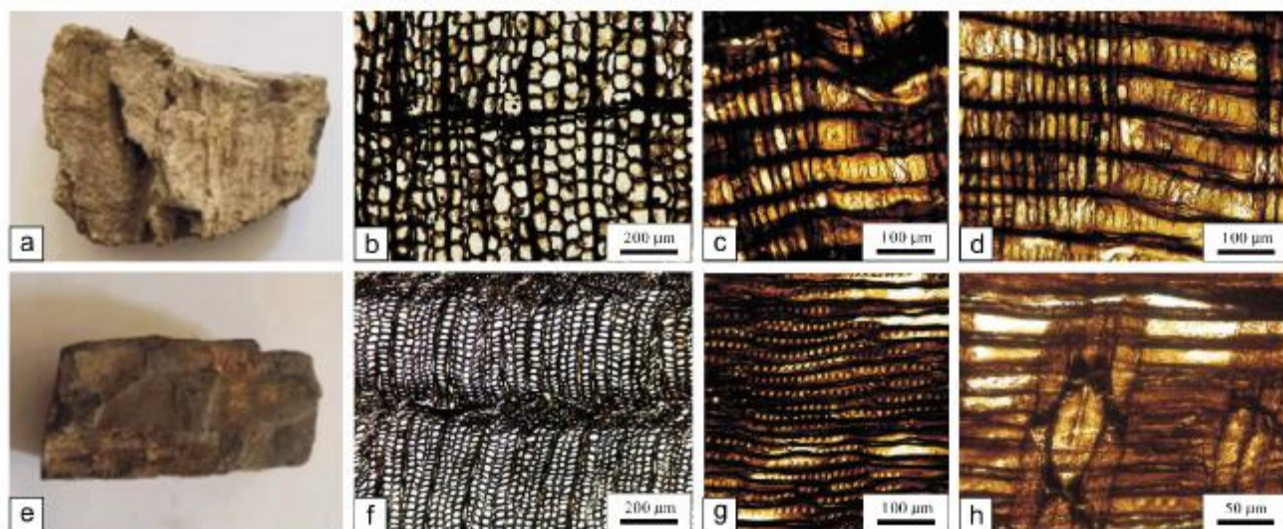


图1 延庆晚侏罗世硅化木外部形态及木材解剖构造特征

Fig. 1 External morphology and anatomical structure of the Late Jurassic silicified wood in Yanqing District

标本DYSYQGHM-1:a—外部形态(external morphology); b—横切面生长轮(growth ring in cross section); c、d—径切面管胞径壁纹孔及交叉场纹孔(tracheid pit and cross-field pit in radial section)。标本DYSYQGHM-2:e—外部形态(external morphology); f—横切面生长轮(growth ring in cross section); g—径切面管胞径壁纹孔(tracheid pit in radial section); h—径切面交叉场纹孔(cross-field pit in radial section)

光谱分辨率为 4 cm^{-1} , 测试范围 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$, 波数精度 0.01 cm^{-1} , 累计扫描 16 次, 红外反射光谱经 K-K 变换为红外吸收光谱.

4) 显微镜下标本薄片观察采用日本奥林巴斯公司 BX53 偏光显微镜.

2 结果与讨论

2.1 X 射线荧光分析

标本 1 和标本 2 的 XRF 分析结果见表 1 和表 2. 从表中而可知, 标本 1 和标本 2 的元素组成有如下特点.

表 1 标本 DYSYQGHM-1 的 X 射线荧光光谱分析
SQX 计算结果

Table 1 XRF spectral analysis results
of specimen DYSYQGHM-1

序号	组分	结果	检测限
1	C	2.54	0.02031
2	N	0.220	0.05880
3	O	54.5	0.35155
4	Na	0.0405	0.00323
5	Mg	0.0374	0.00433
6	Al	0.153	0.00202
7	Si	41.9	0.00899
8	P	0.0036	0.00082
9	S	0.0362	0.00109
10	Cl	0.0115	0.00295
11	K	0.0235	0.00092
12	Ca	0.364	0.00113
13	Mn	0.0253	0.00172
14	Fe	0.154	0.00136
15	Ni	0.0049	0.00086
16	Zn	0.0034	0.00066
17	Sr	0.0018	0.00041

单位: % (质量分数); 分析方法: C-U-20.

1) 标本 1 中存在的主要元素为 O 和 Si, 微量元素为 Ca、Fe、Al、Na、Mg、P、S、Cl、K、Mn、Ni、Zn、Sr; 标本 2 中主要元素为 O 和 Si, 微量元素为 Fe、Ca、Al、Na、Mg、

表 2 标本 DYSYQGHM-2 的 X 射线荧光光谱分析
SQX 计算结果

Table 2 XRF spectral analysis results
of specimen DYSYQGHM-2

序号	组分	结果	检测限
1	C	3.92	0.02186
2	N	0.197	0.06159
3	O	53.9	0.35014
4	Na	0.0422	0.00316
5	Mg	0.0353	0.00429
6	Al	0.154	0.00202
7	Si	41.3	0.00888
8	P	0.0035	0.00073
9	S	0.0394	0.00106
10	K	0.0312	0.00091
11	Ca	0.168	0.00110
12	Mn	0.0140	0.00174
13	Fe	0.249	0.00140
14	Ni	0.0020	0.00088
15	Sr	0.0011	0.00041
16	Ba	0.0196	0.00474

单位: % (质量分数); 分析方法: C-U-20.

P、S、K、Mn、Ni、Sr、Ba. 标本 1 和标本 2 中主要元素种类一致, 均为 O 和 Si; 微量元素大部分种类相同, 小部分种类不同, 其中标本 1 含有 Cl、Zn, 而标本 2 含有 Ba. 表明不同种属植物对不同元素的吸收情况不同^[18].

2) 标本 1 与标本 2 中各种元素含量不完全相同, 如 Na、Mg、Al、O、Si、P 和 S 等大部分元素含量基本相同, 仅 Ca 和 Fe 等少数元素含量相差较大. 由此说明相同埋藏环境下形成的硅化木成因类似, 但并不完全相同.

3) 标本 1 中 Mn、Ca 和 Ni 元素含量是标本 2 中的 2 倍左右, 而 Fe 元素含量是标本 2 的 0.6 倍. 含 Mn 较多时, 颜色发黑; 含 Ca 较多时, 颜色发黄; 含 Ni 较多时, 颜色发白; 含 Fe 较多时, 颜色发红. 从图 1 可知, 标本 1 与标本 2 颜色不同, 标本 1 偏黄, 标本 2 偏红. 这表明硅化木的颜色与自身所含部分元素及其含量密切相关^[19-20].

2.2 X 射线衍射分析

标本 1 和标本 2 的 XRD 测试结果如图 2、3 和表 3、4 所示。标本 1 和标本 2 的 X 射线衍射图谱非常相似,衍射峰的峰位基本一致,峰值非常接近,仅有极微小差异。标本 1 主要 d 值为 4.2709 ($2\theta=20.781$), 3.3531 ($2\theta=26.562$), 1.8206 ($2\theta=50.061$);标本 2 主要 d 值为 4.2595 ($2\theta=20.837$), 3.3461 ($2\theta=26.618$), 1.8186 ($2\theta=50.118$), 与 SiO_2 (石英)的特征谱线一致^[21]。图 2、3 显示 2 个标本中均未出现其他矿物的明显峰位,表明其主要组成物相为 SiO_2 ,其他矿物极微量。

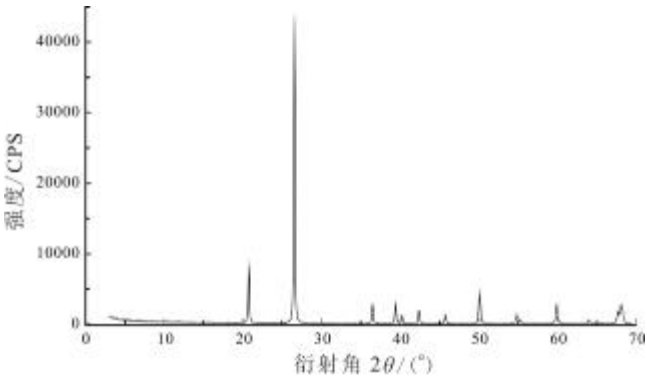


图 2 标本 DYSYQGHM-1 的 XRD 光谱
Fig. 2 XRD spectra of specimen DYSYQGHM-1

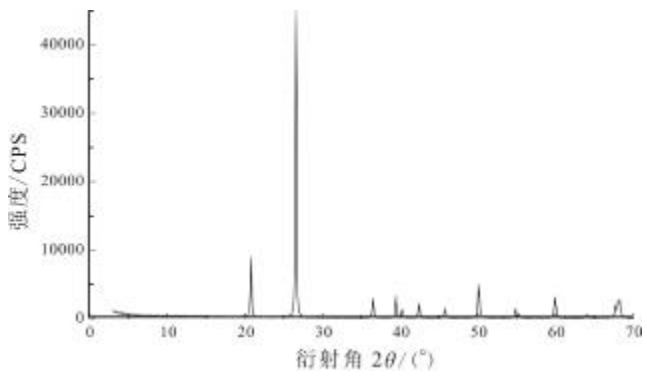


图 3 标本 DYSYQGHM-2 的 XRD 光谱
Fig. 3 XRD spectra of specimen DYSYQGHM-2

2.3 红外光谱分析

红外光谱测试结果(图 4、5)表明:标本 1 和标本 2 的红外吸收光谱特征一致,在指纹区有 3 个很强的吸收峰,其中以 1083.80 cm^{-1} 的红外吸收峰最强,为 O-Si-O 的非对称伸缩振动; 800.31 cm^{-1} 为 O-Si-O 的对称伸缩振动; 464.76 cm^{-1} 和 466.69 cm^{-1} 为 O-Si-O 的弯曲振动,以上 3 峰说明 2 个硅化木标本主要成分一

表 3 标本 DYSYQGHM-1 的 XRD 衍射分析结果

Table 3 XRD results of specimen DYSYQGHM-1

序号	衍射角 2θ/(°)	晶面间距 d/Å	背底 强度	衍射峰 强度	相对强度/ %	半高宽
1	20.781	4.2709	232	8125	18.7	0.182
2	26.562	3.3531	243	43471	100	0.181
3	36.48	2.461	104	2804	6.4	0.2
4	39.383	2.2861	110	2776	6.4	0.212
5	40.221	2.2403	103	1311	3	0.195
6	42.38	2.1311	107	1907	4.4	0.209
7	45.721	1.9828	108	1342	3.1	0.186
8	50.061	1.8206	118	4868	11.2	0.226
9	54.8	1.6738	89	1504	3.5	0.219
10	55.242	1.6615	88	648	1.5	0.287
11	59.9	1.5429	93	2928	6.7	0.248
12	63.959	1.4545	76	603	1.4	0.226
13	67.697	1.3829	102	1798	4.1	0.317
14	68.062	1.3764	150	2650	6.1	0.627
15	68.221	1.3736	164	2536	5.8	0.519

表 4 标本 DYSYQGHM-2 的 XRD 衍射分析结果

Table 4 XRD results of specimen DYSYQGHM-2

序号	衍射角 2θ/(°)	晶面间距 d/Å	背底 强度	衍射峰 强度	相对强度/ %	半高宽
1	20.837	4.2595	270	8766	19.5	0.19
2	26.618	3.3461	298	45016	100	0.193
3	36.519	2.4585	125	2925	6.5	0.202
4	39.438	2.283	119	3167	7	0.201
5	40.278	2.2373	115	1264	2.8	0.223
6	42.438	2.1283	101	2135	4.7	0.218
7	45.778	1.9805	79	1507	3.3	0.277
8	50.118	1.8186	123	4898	10.9	0.247
9	54.822	1.6732	86	1343	3	0.372
10	55.301	1.6598	106	637	1.4	0.331
11	57.226	1.6085	74	76	0.2	0.219
12	59.937	1.5421	92	3079	6.8	0.274
13	63.982	1.454	85	558	1.2	0.255
14	65.664	1.4207	94	113	0.3	0.163
15	67.7	1.3829	99	1865	4.1	0.456
16	68.1	1.3757	152	2634	5.9	0.674
17	68.241	1.3732	97	2560	5.7	0.592

致,均为 SiO_2 ,属石英质玉石^[16,22-24],与辽宁朝阳、重庆綦江的硅化木相同^[7,10]。此外,在 3432.67 cm^{-1} 的弱吸收峰为吸附水分子间的 O-H 伸缩振动,表明 2 个标本中均含有少量吸附水。

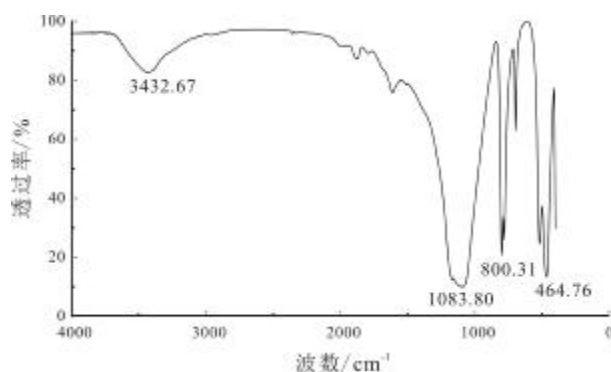


图 4 标本 DYSYQGHM-1 红外图谱

Fig. 4 Infrared spectrum of specimen DYSYQGHM-1

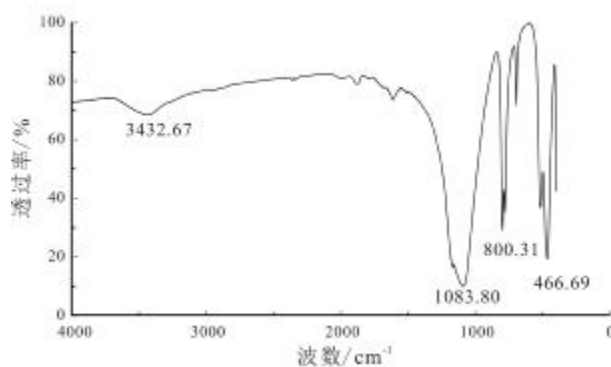


图 5 标本 DYSYQGHM-2 红外图谱

Fig. 5 Infrared spectrum of specimen DYSYQGHM-2

2.4 偏光显微镜分析

标本 1 和标本 2 的薄片在显微镜下观察结果见图 6。单偏光镜下可见均保留了原植物细胞结构,细胞壁为棕色,细胞质为无色。棕色可能是因为微量元素比较集中的部位,而无色是较纯净的隐晶质石英部位。在正交偏光镜下,可显示一级灰白的干涉色(薄片过厚时可达一级红或更高的干涉色),但是无石英颗粒的明确边界,而是类似于波状消光的渐变性质。因此,2 个硅化木标本中所含石英均为隐晶质结构,与云南硅化木的晶质结构和缅甸硅化木的微晶质结构不同^[25]。

2.5 古生态环境分析

北京延庆地区土城子组山间湖沼相沉积的浅绿色页岩和粉砂岩地层中原地保存有数十株直径 0.2~1.5 m 的硅化木。由此推断,晚侏罗世早期这里有过茂密的

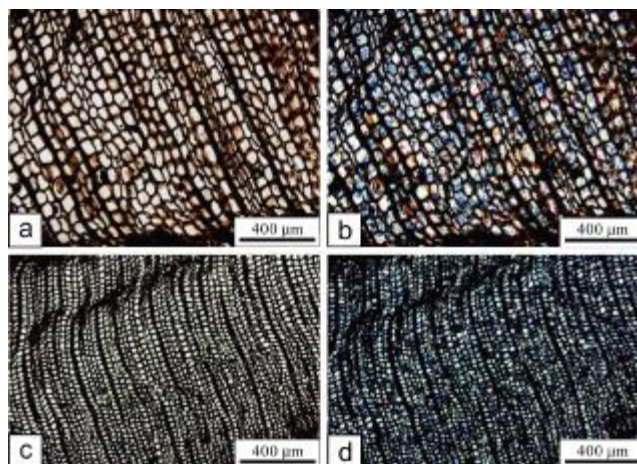


图 6 硅化木标本横切面偏光显微镜照片

Fig. 6 Microphotographs of cross sections of silicified wood specimens

标本 DYSYQGHM-1: a—单偏光照片(plane-polarized light); b—正交偏光照片(cross-polarized light)。标本 DYSYQGHM-2: c—单偏光照片(plane-polarized light); d—正交偏光照片(cross-polarized light)

森林,并存在大规模的湖泛活动和火山活动^[26]。异木属是比较喜欢温湿环境的植物^[27],而短木属则是比较喜欢干旱环境的植物^[28]。同一层位不同的植物种属表明,这里当时为浅水环境,与前人得出的延庆地区在晚侏罗世早期处于半干旱-半湿润的气候条件结论一致^[29]。

3 结论

1) 2 个不同植物种属但在同一埋藏地形成硅化木标本成因相似,其颜色与所含元素种类及含量密切相关,但其主要组成物相一致,均为 SiO_2 (石英),其他矿物极微量。

2) 2 个硅化木标本的红外吸收谱带基本一致,均显示典型的石英质玉石红外吸收光谱,且含有少量吸附水。

3) 偏光显微镜下显示,2 个硅化木标本的主要矿物均为隐晶质石英,与云南硅化木晶质结构和缅甸硅化木微晶质结构不同。

4) 延庆土城子组硅化木的沉积环境为较浅的湖沼沉积,当时处于半干旱-半湿润的气候条件下,并伴随火山活动。

参考文献(References):

- [1] 王加恩,王振,刘远栋,等. 浙江衢州硅化木埋藏时限及生态环境分析[J]. 地层学杂志, 2019, 43(3): 315-323.

- Wang J E, Wang Z, Liu Y D, et al. Burial time constrain and ecological environment analysis of the silicified wood in Quzhou, Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(3): 315–323.
- [2] 蒋子堃, 王永栋, 田宁, 等. 辽西北票中晚侏罗世髫髻山组木化石的古气候、古环境和古生态意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(8): 1669–1678.
- Jiang Z K, Wang Y D, Tian N, et al. Paleoclimate and paleoenvironment implications of the Middle-Late Jurassic Tiaojishan Formation, western Liaoning Province: Evidence from fossil wood data [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(8): 1669–1678.
- [3] 邓胜徽. 中生代主要植物化石的古气候指示意义[J]. *古地理学报*, 2007, 9(6): 559–574.
- Deng S H. Palaeoclimatic implications of the main fossil plants of the Mesozoic[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(6): 559–574.
- [4] 肖良, 漆亚玲, 马文忠, 等. 吐哈盆地北缘中侏罗世植物化石稳定碳同位素的古环境意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 489–498.
- Xiao L, Qi Y L, Ma W Z, et al. Stable carbon isotope of Middle Jurassic plant fossils in the north edge of Turpan-Hami Basin, Xinjiang and their palaeoenvironmental implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 489–498.
- [5] 程业明, 袁铁梅, 李承森. 浙江宁海早上新世枫香树属和栎属化石木及其古环境意义[J]. *古地理学报*, 2013, 15(1): 105–112.
- Cheng Y M, Yi T M, Li C S. Identification of the early Early Pliocene fossil woods from Ninghai in Zhejiang Province and its palaeoenvironmental implications [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(1): 105–112.
- [6] 张元福, 魏小洁, 徐杰, 等. 北京延庆硅化木公园地质剖面陆相层序地层特征分析[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 68–77.
- Zhang Y F, Wei X J, Xu J, et al. Continental sequence stratigraphy analysis of “Fossil Wood” Geological Park Section in Yanqing County, Beijing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 68–77.
- [7] 席晓光. 朝阳硅化木的矿物成份分析及宝石特征[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2007, 26(3): 464–466.
- Xi X G. Mineral composition analysis of petrified wood in Chaoyang and study on its features[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(3): 464–466.
- [8] 段淑英. 北京硅化木林[J]. *植物学报*, 1986, 28(3): 331–335.
- Duan S Y. A petrified forest from Beijing[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1986, 28(3): 331–335.
- [9] 段淑英. 中国东北辽宁省西部几种中生代化石木[J]. *植物学报*, 2000, 42(2): 207–213.
- Duan S Y. Several fossil woods from Mesozoic of western Liaoning Province, Northeast China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(2): 207–213.
- [10] 邓建国, 王丰平, 谢显明. 利用 XRD, XRF, FT-IR, RS, SEM 和 DSC 分析綦江木化石及围岩[J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 2018, 31(5): 1–8.
- Deng J G, Wang F P, Xie X M. Analysis of wood fossils and surrounding rocks from Qijiang region by XRD, XRF, FT-IR, RS, SEM and DSC [J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2018, 31(5): 1–8.
- [11] 陈全莉, 周冠敏, 尹作为. 珊瑚化石的红外光谱及 XRD 研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(8): 2246–2249.
- Chen Q L, Zhou G M, Yin Z W. Infrared spectroscopy and XRD studies of coral fossils[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2246–2249.
- [12] Shi X, Sun Y W, Huang R. Fossil woods from the Early Pennsylvanian Karamaili area, Xinjiang, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2020, 94(5): 1716–1717.
- [13] Jiang Z K, Wang Y D, Tian N, et al. The Jurassic fossil wood diversity from western Liaoning, NE China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 8(1): 1.
- [14] Piga G, Santos-Cubedo A, Brunetti A, et al. A multi-technique approach by XRD, XRF, FT-IR to characterize the diagenesis of dinosaur bones from Spain[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 310(1/2): 92–107.
- [15] Yoon C J, Kim K W. Anatomical descriptions of silicified woods from Madagascar and Indonesia by scanning electron microscopy[J]. *Micron*, 2008, 39(7): 825–831.
- [16] 张跃峰, 丘志力, 程银鹰, 等. 广东省石英质“台山玉”矿物谱学及其标型特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 956–960.
- Zhang Y F, Qiu Z L, Cheng Y Y, et al. Spectral and typomorphic characteristics of quartzose jade from Taishan, Guangdong Province [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 956–960.
- [17] 李月彤, 权晓云, 施光海. 新疆奇台和缅甸蒲甘硅化木的宝石学特征[J]. *宝石和宝石学杂志*, 2016, 18(2): 26–33.
- Li Y T, Quan X Y, Shi G H. Gemmological characteristic of petrified wood from Qitai, Xinjiang and Pagan, Burma[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 2016, 18(2): 26–33.
- [18] 王亚平, 许春雪, 王苏明. 树木年轮与其根部土壤化学元素含量的相关性[J]. *地质通报*, 2005, 24(10/11): 952–956.
- Wang Y P, Xu C X, Wang S M. Correlation between chemical element contents in tree rings and those in soils near tree roots in the southern suburbs of Beijing, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10/11): 952–956.
- [19] 周维丽. 硅化木的鉴定特征、成因与分类评价研究[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学、医学版)*, 2014, 35(1): 8–13.
- Zhou W L. The identification characteristics, causes and classification evaluation research of silicified wood[J]. *Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences, Medicine)*, 2014, 35(1): 8–13.
- [20] 王义昭. 缅甸硅化木(“树化玉”)的成因[J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1628–1637.
- Wang Y Z. The genesis of silicified wood (Shuhuiyu) of Myanmar [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1628–1637.

- [21]张天乐, 王宗良, 胡云中. 腾冲现代热泉系统硅华的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(2): 170-178.
Zhang T L, Wang Z L, Hu Y Z. Mineralogy of geyserite from the Tengchong active hot spring system and its geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1997, 16(2): 170-178.
- [22]法默 V C. 矿物的红外光谱[M]. 应育浦, 等译. 北京: 科学出版社, 1982: 304.
Farmer V C. Infrared spectrum of minerals[M]. Ying Y P, et al. trans. Beijing: Science Press, 1982: 304. (in Chinese)
- [23]陈全莉, 袁心强, 贾璐. 台湾蓝玉髓的振动光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1549-1551.
Chen Q L, Yuan X Q, Jia L. Study on the vibrational spectra characters of Taiwan blue chalcedony[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1549-1551.
- [24]余炼钢, 张烨. 两块相似石英质宝石的谱学鉴别及启示[J]. 超硬材料工程, 2020, 32(4): 62-65.
Yu L G, Zhang Y. Spectrographic identification of two similar quartz gemstones and its enlightenment[J]. Superhard Material Engineering, 2020, 32(4): 62-65.
- [25]雷芳芳. 缅甸硅化木与云南硅化木的岩石学特征对比研究[J]. 景德镇学院学报, 2020, 35(6): 61-64.
Lei F F. A comparative study on the petrological characteristics of petrified wood from Burma and Yunnan[J]. Journal of Jingdezhen University, 2020, 35(6): 61-64.
- [26]贺瑾瑞, 焦润成, 南赞, 等. 北京延庆千家店盆地土城子组古生物化石及古气候沉积环境——延庆地区首次发现疑似恐龙骨骼化石[J]. 地质通报, 2017, 36(8): 1319-1329.
He J R, Jiao R C, Nan Y, et al. A discussion on Tuchenzi fossils and paleoclimate sedimentary environment in Qianjiadian basin of Yanqing County: Suspected dinosaur bones discovered for the first time in Yanqing, Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(8): 1319-1329.
- [27]Tian N, Xie A W, Wang Y D, et al. New records of Jurassic petrified wood in Jianchang of western Liaoning, China and their palaeoclimate implications[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(12): 2154-2164.
- [28]Jiang Z K, Wu H, Tian N, et al. A new species of conifer wood Brachyoxylon from the Cretaceous of eastern China and its paleoclimate significance[J]. Historical Biology, 2021, 33(10): 1989-1995.
- [29]何情, 张建平, 邢立达, 等. 北京延庆千家店地区土城子组恐龙足迹点沉积环境[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1726-1734.
He Q, Zhang J P, Xing L D, et al. Sedimentary environment of Tuchengzi Formation dinosaur track site in Qianjiadian area, Yanqing County, Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1726-1734.

(上接第 58 页/Continued from Page 58)

- [25]蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 2-45, 77-105.
Pu X C, Zhou H D, Wang X L, et al. Cambrian lithofacies, paleogeography and mineralization in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 2-45, 77-105.
- [26]王崇武, 朱隆光, 阙竟成, 等. 扬子西区早寒武世磷块岩矿床形成的地质背景[J]. 云南地质, 1985, 4(1): 33-58.
Wang C W, Zhu L G, Que J C, et al. Geological setting in which early Cambrian phosphorite deposits formed in the west region of the Yangtze platform[J]. Yunnan Geology, 1985, 4(1): 33-58.
- [27]刘怀仁. 扬子区早寒武世磷块岩沉积相及古地理[J]. 四川地质学报, 1982, 3(2): 88-89.
Liu H R. Sedimentary facies and paleogeography of Early Cambrian phosphorus block in the Yangtze region [J]. Journal of Sichuan Geology, 1982, 3(2): 88-89. (in Chinese)
- [28]贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 453-500.
Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 453-500. (in Chinese)
- [29]郭福生. 浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 136-141.
Guo F S. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and Carbonate of Outangdi formation in Jiangshan, Zhejiang Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 136-141.
- [30]夏学惠, 黄青山. 滇池地区沉积磷块岩中胶磷矿矿物学特征及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989(1): 56-57.
Xia X H, Huang Q S. Collophane from phosphorites in Dianchi area, Yunnan Province: A mineralogical study[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1989(1): 56-57. (in Chinese)
- [31]汪寿松, 陈其英. 昆阳磷矿磷块岩的矿物组成[J]. 地质科学, 1985(1): 78-86.
Wang S S, Chen Q Y. The mineral composition of the phosphorite of Kunyang[J]. Chinese Journal of Geology, 1985(1): 78-86.
- [32]吴祥和. 贵州磷块岩[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 19-74.
Wu X H. The phosphorites of Guizhou [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 19-74. (in Chinese)