

doi:10.3799/dqkx.2016.525

# 吐哈盆地中二叠世古气候重建:来自木化石年轮的证据

魏信祥<sup>1,2</sup>, 张雄华<sup>1\*</sup>, 黄兴<sup>1</sup>, 栾腾飞<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 江西省核工业地质局测试研究中心, 江西南昌 330002

**摘要:** 收集木化石年轮数据有助于古气候重建工作。首次通过对吐哈盆地北东缘中二叠统塔尔郎组中发现的木化石的年轮统计分析, 还原了吐哈盆地中二叠世的古气候演化过程。木化石的年轮分析表明: 该区中二叠世整体处于季节性明显的北亚热带, 气候整体相对温暖, 但出现过间歇性相对炎热的气候。木化石较低的晚材率以及部分年轮早材到晚材为过渡突变, 反映树木生长时期季节性非常明显, 夏季湿热, 冬季干冷, 为典型的亚热带季风型气候。木化石具有较高的平均敏感度 ( $MS$  平均可达 0.4), 显示树木生长期间受季风气候的影响, 环境非常不稳定, 每年大气降水量有很大的变化。连续年轮宽度的宽窄不一以及伪年轮的存在, 表明当时气候变化频繁, 整体较为湿润, 但也具有干旱—半干旱的波动。

**关键词:** 吐哈盆地; 中二叠世; 木化石; 年轮; 气候学。

**中图分类号:** P532; Q914.21

**文章编号:** 1000-2383(2016)10-1771-10

**收稿日期:** 2016-03-22

## Palaeoclimate Reconstruction of Middle Permian in Tuha Basin: Evidence from the Fossil Wood Growth Rings

Wei Xinxiang<sup>1,2</sup>, Zhang Xionghua<sup>1\*</sup>, Huang Xing<sup>1</sup>, Luan Tengfei<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Jiangxi Nuclear Industry Geological Bureau Testing Center, Nanchang 330002, China

**Abstract:** The collection of fossil wood growth rings data is helpful for rebuilding paleoclimate. Based on the statistical analysis of fossil wood growth rings from Middle Permian Taerlang Formation in the northeast edge of Tuha basin, the paleoclimate evolution of Middle Permian is reconstructed for the first time. The analysis of fossil wood growth rings shows that this area was subject to north subtropical climate with obvious seasonal variations during the Middle Permian. The paleoclimate was relatively warm, but intermittent hot climate had occurred. The low percentage of latewood and the abrupt transition between earlywood and latewood of some growth rings reflect that the seasonal variations were very obvious during the period of trees' growth. The paleoclimate was prevailed by a subtropical monsoon climate with hot and humid summer and dry and cold winter. The relatively high mean sensitivity ( $MS$  average of 0.4) of fossil woods indicates that trees were influenced by monsoon climate during the growth period, and the environment was very unstable with uneven annual precipitation. The change of consecutive growth ring width and the existence of false rings implies that the climate changed frequently and generally was humid with arid and semi-arid fluctuations.

**Key words:** Tuha basin; Middle Permian; fossil wood; growth rings; climatology.

吐鲁番—哈密盆地(简称吐哈盆地)是新疆3大含油气盆地之一, 拥有丰富的油气资源及良好的勘探前景(袁明生, 1998)。吐哈盆地的二叠系有很好的烃源岩分布, 主要集中在中二叠统, 其次为下二叠统

的上部(王昌桂和杨飏, 2004)。通过野外剖面、井下剖面对比, 结合古生物资料及测年数据, 刘延莉和柳益群(2004)认为吐哈盆地中二叠统塔尔郎组与三塘湖盆地的主要生油层系和储集层系—二叠系芦苇沟

**基金项目:** 中国地调局工作项目(No.1212011120966)。

**作者简介:** 魏信祥(1991—), 男, 硕士, 主要从事地层与古生物研究。E-mail: 1223054333@qq.com

\* **通讯作者:** 张雄华, E-mail: 1065250198@qq.com

**引用格式:** 魏信祥, 张雄华, 黄兴, 等, 2016. 吐哈盆地中二叠世古气候重建: 来自木化石年轮的证据. 地球科学, 41(10): 1771-1780.

组沉积特征非常相似,在岩性和生物群上均可对比,都具有重要的油气勘探意义。吐哈盆地北部台北凹陷的中二叠统发现有巨厚的暗色泥岩夹油页岩、泥灰岩及巨型含油钙质结核,表明其为很好的烃源岩,具有良好的生油潜能(柳益群等,2002)。

众所周知,烃源岩和储积岩的形成与古地理及古气候关系密切,温暖潮湿的气候生物繁盛,能形成很好的烃源岩。气候与生油作用有着密切的关系(Barron,1985;吴绍祖,1998),因此吐哈盆地中二叠世古气候的研究对生油层的预测非常重要。长期以来,关于吐哈盆地晚古生代的古气候问题一直受到不少学者的关注,但前人大多从沉积环境、沉积相的角度出发(刘洪福,1992;徐加林等,2013),或者依据所发现的动物化石、古植物叶片化石、气候敏感沉积物等以综述的形式对该地区古气候进行了阐述(Ziegler,1990;吴绍祖,1996;Rees *et al.*,1999;韩玉玲,2000;李强等,2002;欧阳舒等,2003)。如上所述,尽管前人对于吐哈盆地二叠纪的古气候研究取得了一定的进展,但依然缺乏足够确实可信的证据。同时还存在着研究范围广,时间尺度大等问题,很少有人专门对吐哈盆地中二叠世的古气候背景及古气候演化进行探讨。

当前,树木年轮分析已经广泛应用于气候变化的研究之中,并且成为极为重要的研究工具之一(吴祥定,1990;Zhang *et al.*,2003;Liu *et al.*,2004;李雁等,2008;王辉等,2011)。利用树木年轮资料获取气候与环境的变化,不仅成为获取过去气候环境演变数据的重要方法之一,而且可以帮助人们预测未来气候变化(王婷等,2003)。气候变化影响树木生长,每一年的气候变化都会真实地记录在宽窄年轮序列之中,因此借助年轮宽度建立精确的气候数据是可行的(Fritts,1976)。随着研究理论和技术手段的进步,木化石的年轮数据也正不断被用于古气候变化分析,并且取得了一系列很好的成果(丁秋红等,2004;Artabe *et al.*,2007;钱利军等,2010;Pires and Guerra-Sommer,2011)。Taylor and Ryberg(2007)还利用木化石年轮还原了高纬度极地地区晚二叠世一早三叠世树木生长的气候条件,并认为当时树木生长和现代极地地区一样,都主要受限于光照条件的影响。与叶、孢粉等其他植物化石材料相比,木化石是唯一具有逐年气候变化记录的宝贵材料,因而成为近年来古生物领域气候演化定量研究的一个重要工具(李萍,2004)。同时木化石的研究对岩相古地理、生物古地理的恢复具有重要的意

义(张雄华等,2003;邓宝柱等,2015)。因此,利用木化石的年轮数据来推演古气候、古环境的变化是一种可行并且非常有效的方法。

笔者在吐哈盆地北东缘天山乡地区的二叠纪地层中发现年轮保存完好的木化石,它们主要集中出于中二叠统塔尔朗组。本文将通过对塔尔朗组木化石年轮的数据统计分析,来揭示该地区中二叠世的古气候演化,为吐哈盆地塔尔朗组的石油勘察工作提供切实可行的理论指导。

## 1 地质背景

吐哈盆地地处亚洲大陆腹地,是中亚造山带在中国区域内的重要组成部分,其北侧为博格达—哈尔里克造山带,南侧为觉罗塔格山造山带,近 EW 向延伸(徐加林等,2013)。该区晚古生代经历了洋盆俯冲、闭合、陆块碰撞造山等强烈的构造运动,自早二叠世开始全面进入碰撞期后陆内造山阶段,早二叠世陆上火山喷发岩相占主导地位,中一晚二叠世则主要为盆地河流—湖泊相沉积(杨彝,2010)。吐哈盆地北部地区二叠系发育齐全,底部角度不整合覆于石炭系之上,顶部与上覆的下三叠统韭菜园组整合接触。自下往上分别为下二叠统阿其克布拉克组(刘洪福(1992)也称其为阿其克布拉克群,徐加林等(2013)则把它叫为伊尔稀土组)、中二叠统大河沿组及塔尔朗组、上二叠统泉子街组、梧桐沟组及锅底坑组。此次所采集的木化石大多产于塔尔朗组,其主要为一套粉砂质泥岩、粉砂岩夹砂岩、含砾砂岩及砾岩。根据吐哈盆地塔尔朗组中所产的大量植物叶片化石,刘陆军和姚兆奇(1996)推断塔尔朗的时代应属晚二叠世早期(二叠纪两分),即相当于沃德期—卡匹敦期。郑和荣和胡宗全(2010)所编的《中国前中生代古地理图集》,认为研究区在中二叠世整体处于陆内冲积扇—河流、湖泊沉积环境。二叠纪期间,冈瓦纳大陆向北漂移与劳亚大陆聚合,联合古陆初步形成,吐哈盆地大致位于环古特提斯洋的北岸(图 1b)。

## 2 研究材料与方法

此次所采集的木化石样品位于哈密市天山乡东侧约 1.5 km 处(图 1),共发现 6 处木化石出露层位,采集木化石 7 块。木化石出露点比较零星分散,按木化石产出的层位,由下往上依次可大致分为 3 个小

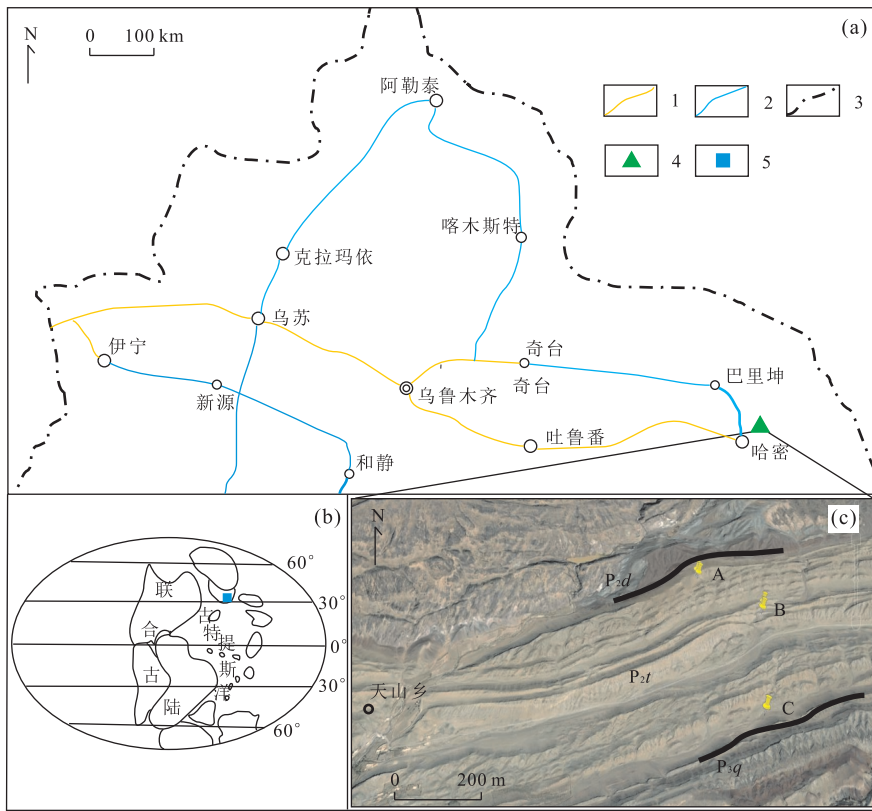


图 1 研究区位置

Fig.1 The traffic of study area

a. 研究区的交通位置; b. 研究区二叠纪古地理位置(据 Scotese, 2002 修改); c. 木化石产出位置; 1. 高速公路; 2. 国道或省道; 3. 国界线; 4. 木化石产地; 5. 研究区;  $P_{2d}$ . 大河沿组;  $P_{2t}$ . 塔尔朗组;  $P_{3q}$ . 泉子街组

区: A 区采集了 1302 号木化石; B 区采集了 1303~1304 号木化石; C 区采集了 1305~1307 号木化石(图 1)。其中 B 区的 1303 号采集了 2 块木化石, 其他的每个层位都采 1 块。木化石产于中二叠统塔尔朗组之中, 虽然各个木化石的野外产出状态、个体大小等存在明显差异, 但它们赋存层位的岩性却基本类似, 以绿灰—黄绿色砂岩、含砾砂岩为主(图 2a)。

本文木化石年轮分析主要参照现代木材年轮气候学的方法(Fritts, 1976; 李雁等, 2008; 王辉等, 2011), 同时还借鉴木化石所特有的年轮气候分析手段(Artabe *et al.*, 2007; Taylor and Ryberg, 2007; Pires and Guerra-Sommer, 2011)。首先在实验室对木化石的横切面进行切片, 然后由内向外对逐个年轮数据进行统计分析。由于树木遗传因素的影响, 靠近树心的年轮一般较窄, 树木青年时期的年轮通常最宽, 以后随着树龄增长, 年轮宽度逐渐变窄, 最后趋于稳定(吴祥定, 1990)。因此为了消除由于树木遗传因素而造成的年轮宽度变化, 在切片的时候只选择木化石成熟时期的那部分进行制片。

此次木化石年轮数据分析选取了年轮宽度、细

胞个数、早材细胞平均大小、晚材率等 4 个树轮指标。用 OLYMPUS 偏光显微镜对树轮指标进行测量, 为了保证测量的代表性, 对每个年轮沿径向随机选取大致平行的 5 条线, 测量年轮宽度、细胞个数, 取 5 次测量的算术平均值作为每个年轮的宽度及细胞个数(王辉等, 2011)。每次随机测量 30 个早材管胞的径向细胞直径, 取其算术平均值作为早材细胞平均大小(金春德等, 2001)。通常把管胞径向直径开始明显偏小, 颜色相对更深的那部分作为晚材(图 2b), 随机测量 5 次宽度, 取其算术平均值作为晚材宽度。晚材率即为晚材宽度与年轮宽度的比值(符韵林, 2003)。平均敏感度(MS)用来度量树木相邻年轮之间年轮宽度的变化情况, 是反映气候变化的重要指标, 其计算公式:

$$MS = 1/(n-1) \sum_{i=1}^{n-1} |2(X_{t+1} - X_t)/(X_{t+1} + X_t)|,$$

式中:  $X$  为年轮宽度;  $t$  为年轮序号;  $n$  为年轮总数。MS 值的变化范围一般在 0~2; MS 小于 0.3, 为满足序列, 表明树木生长在水分供给充足、较均衡的环境。MS 大于 0.3, 则为敏感序列, 说明树木生长过程

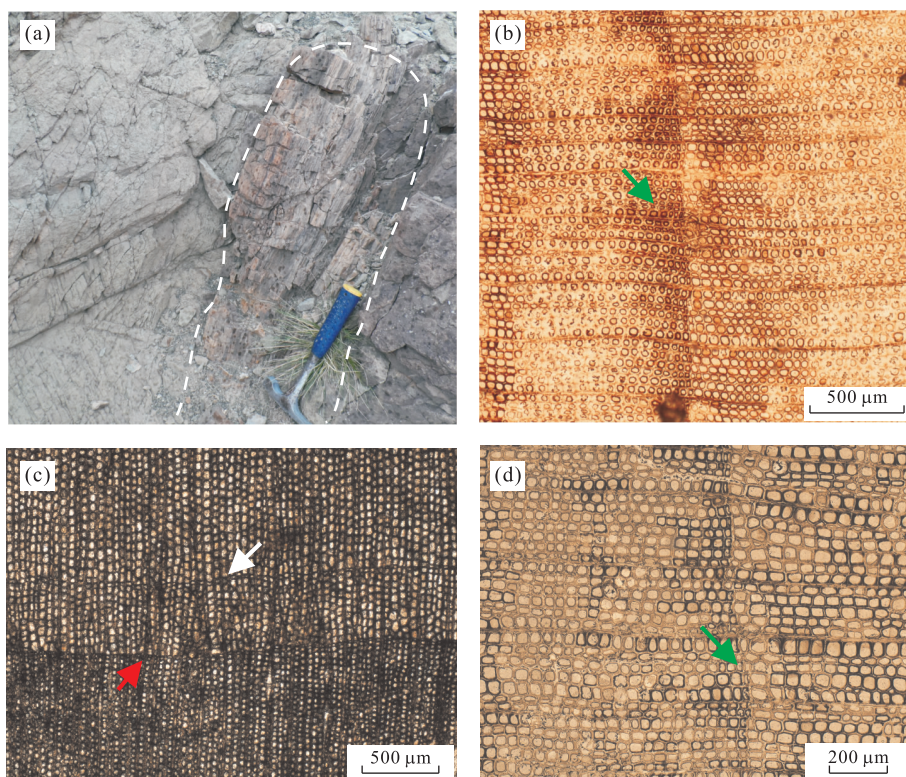


图 2 塔朗组木化石样品及年轮的镜下显微特征

Fig.2 Fossil wood of Taerlang Formation and the microscopic features of growth rings under microscope

a. 木化石野外照片, 其中地质锤长约 30 cm; b. 颜色更深的晚材(绿色箭头); c. 木化石中的年轮(红色箭头)与伪年轮(白色箭头); d. 极窄的晚材, 晚材细胞 1~3 个(绿色箭头)

中各年水分条件变化较大(Fritts, 1976).

### 3 木化石年轮计算结果与分析

在所采集的 7 个木化石样品中, 除了 1306 号没有年轮, 其他 6 个都有明显或略明显的年轮, 统计数据就从这 6 个木化石样品共 84 个年轮中获得(表 1). 由于木化石的保存原因, 它不可能和现代木材一样获得完整的年轮序列, 因此所统计的年轮只代表

了那些保存完好的年轮. 不同样品间年轮宽度变化非常大, 从 0.50~9.10 mm(平均 3.42 mm, 表 1). 同一个样品间年轮宽度也有明显变化, 变化幅度最大的是 13031 号, 从 1.22~9.10 mm, 变化幅度最小的 1307 号也可达 1.49 mm(图 3). 木化石年轮宽度的变化反映了气候的强烈变化(丁秋红等, 2004), 说明研究区在中二叠世气候非常不稳定, 具有明显的波动性. 可见有伪年轮出现在 13031 号、1304 号以及 1307 号样品中(图 2c), 和正常生长轮不同, 伪年轮

表 1 木化石年轮计算结果

Table 1 Calculation results of fossil wood growth rings

样品编号	年轮数量	最大轮宽 (mm)	最小轮宽 (mm)	平均轮宽 (mm)	平均细胞个数	平均晚材率 (%)	平均早材细胞大小 ( $\mu\text{m}$ )	平均敏感度
1302	7	5.32	3.63	4.33	65	15.9	52	0.19
13031	17	9.10	1.22	5.05	99	21.7	49	0.47
13032	18	2.16	0.50	1.20	24	17.8	42	0.39
1304	15	7.76	0.52	4.89	101	12.8	44	0.71
1305	15	6.89	1.88	3.75	60	8.0	44	0.27
1306	无年轮	无年轮	无年轮	无年轮	无年轮	无年轮	57	\
1307	12	2.27	0.78	1.28	22	12.2	40	0.36
总数/平均	84			3.42	62	14.7	47	0.40

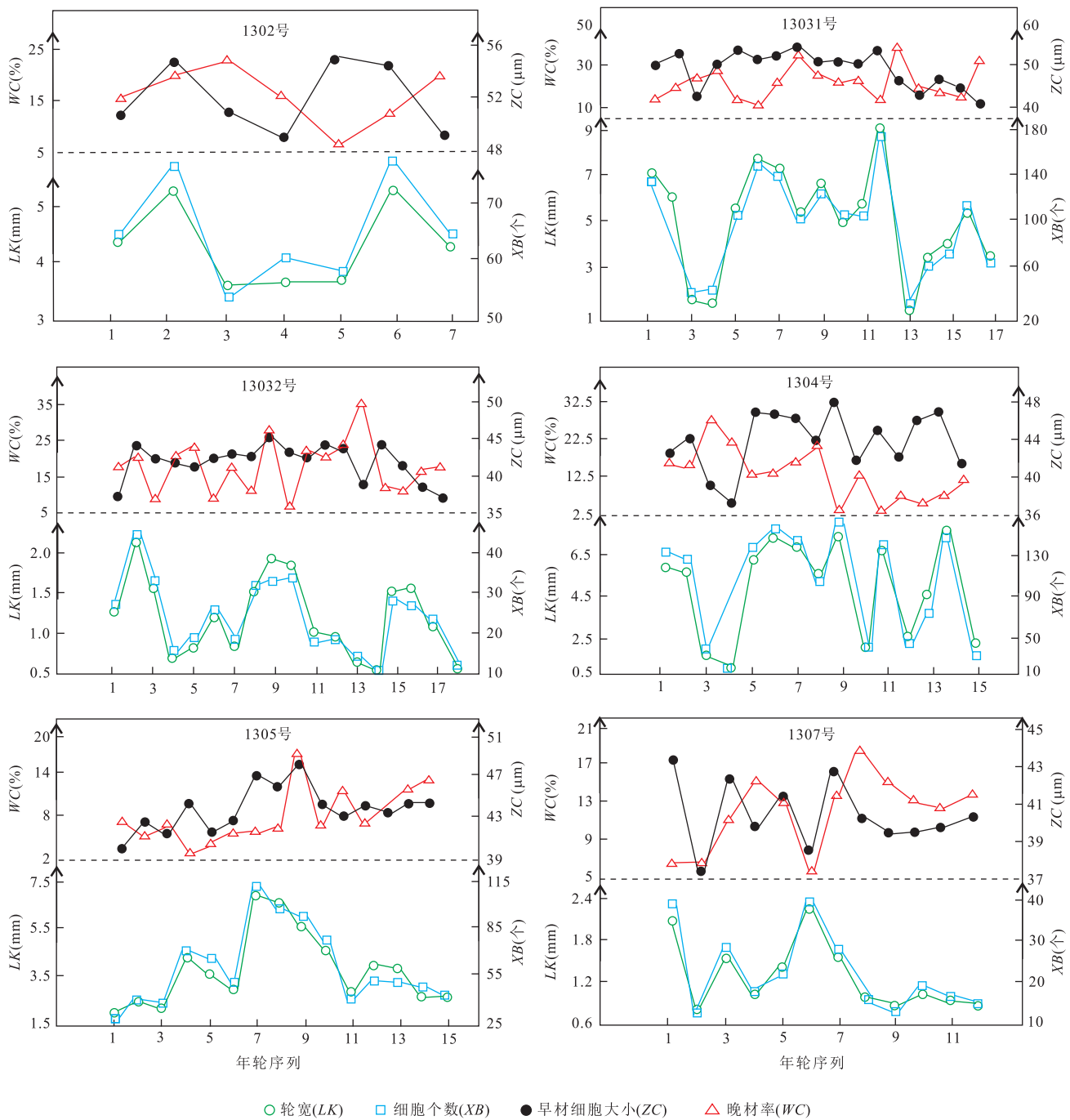


图 3 木化石的年轮统计数据

Fig.3 The statistical data of fossil wood growth rings

的细胞直径和壁厚向内或向外均是逐渐变化的,晚材与下一年早材之间的界线不明显.伪年轮的出现反映了木化石生长过程中环境的扰动,通常是由于在生长季期间,树木受到干旱、昆虫侵害、火灾或霜冻等不利条件造成的(Taylor and Ryberg, 2007).

由图 3 可以看出,木化石年轮中的细胞个数与轮宽变化非常类似,呈明显的正相关.年轮中的细胞个数变化很大,从 22~101 个(平均 62 个,表 1),同

一个样品的细胞个数也与轮宽一样,变化幅度剧烈(图 3).早材细胞大小整体与轮宽呈正相关,二者的变化曲线比较类似(图 3),但其变化幅度相对偏小,从 40~52  $\mu\text{m}$ ,然而不具年轮的 1306 号早材细胞相对较大,平均可达 57  $\mu\text{m}$ .在木化石的年轮分析中,一般认为年轮越宽,指示着越温暖的气候(Fritts, 1976),在树木生长季,更温暖适宜的温度会加快形成层的生长,从而使得年轮中细胞个数变多,早材细

胞直径更大.通过统计大量现代松柏类植物的年轮数据,Falcon-Lang(2005)发现年轮宽度与晚材率没有相关性.然而在 13031 号以及 1304 号木化石中,可以明显看到晚材率与轮宽呈负相关(图 3).木化石的晚材率都较低,从 8.0%~21.7%(平均 14.7%,表 1),更有不少年轮中晚材细胞只有 1~5 个(图 2d).较低的晚材率可能反映了当时的气候具有明显的季节性变化(丁秋红等,2010),早材细胞生长期间气候温暖湿润,树木生长较快、生长期较长;晚材细胞生长时,气候可能相对寒冷干旱,导致形成层生长缓慢,形成较窄的晚材带.

木化石的平均敏感度变化范围为 0.19~0.71(平均 0.40),有 2/3 样品的平均敏感度 $>0.30$ (表 1),为敏感序列,表明这些树木的生长环境非常不规律,各年水分条件变化较大(Pires and Guerra-Sommer,2011).只有 1305 号及 1302 号的平均敏感度 $<0.30$ (表 1),为满足序列,其中 1302 号的平均敏感度非常低,只有 0.19,这可能是由于其统计的年轮数量较少导致的.

#### 4 中二叠世古气候演化

二叠纪末期发生了地质历史时期全球 5 大生物灭绝事件中最大的一次.关于二叠纪的古环境、古气候的研究一直受到广泛的关注.对于吐哈盆地二叠纪的古气候,也有不少学者涉及(吴绍祖,1996;韩玉玲,2000;李强等,2002;Scotese,2002;欧阳舒等,2003).通过统计全球不同时代气候敏感沉积物,Scotese(2002)推断二叠纪全球气候开始回暖,温度升高,由寒冷气候慢慢变为温暖气候.新疆北部二叠纪的植物群,反映了准噶尔地区早二叠世(二叠纪两分)气候由潮湿温和向末期的干旱转化(韩玉玲,2000).中二叠世准噶尔强烈的火山喷发导致了温室事件的形成,油页岩是这个温室事件最强时期的产物(李强等,2002).依据地层中的标志性生物、矿物、岩石,吴绍祖(1996)认为新疆北部早二叠世(二叠纪两分)古气候整体比较温暖,但出现过多次间歇性的炎热气候.结合新疆北部二叠纪古植物与孢粉的研究,欧阳舒等(2003)推测新疆北部二叠纪总体上为温暖半干旱气候,亦有可能有周期性的干—湿变化和年度的季节性变化.综上所述,前人的工作大多集中在整个新疆或新疆北部,甚至全球尺度范围内,存在着研究范围广、精度低、时间尺度大等问题,并且其中包含大量主观定性的推断.

树木年轮普遍受气候条件的影响,在气候呈季节性变化的温带,木材具有年轮;在无季节性变化的热带地区,树木则不具年轮(丁秋红等,2004).塔尔朗组的木化石,只有 1306 号没有年轮,并且其管胞直径较大,平均可达 57  $\mu\text{m}$ ,大大超过了所有木化石早材细胞的平均值(表 1).这表明在它生长期间,气候相对炎热,温度较高,没有明显的季节变化.其他的 6 个木化石都具有明显的年轮,并且晚材率都较低(表 1,图 3),表明它们生长在具有明显季节性变化的温带,夏季气候温暖湿润,冬季则寒冷干旱.这两类木化石在塔尔朗组中混生,表明研究区中二叠世可能处于温带向热带过渡的地区,即亚热带.前人的古地磁研究,测得二叠纪吐哈地块古纬度约为 33°N(李永安等,1992),也表明研究区二叠纪大致位于北半球亚热带地区.与现代亚热带地区的裸子植物相比(封晓辉等,2011;卢翠香等,2012),木化石样品的年轮宽度和晚材率明显小于南亚热带植物,与北亚热带木材更为类似,说明木化石当时主要生长在夏季与冬季温差变化较大、季节性更明显的北亚热带,气候整体相对温暖,但出现过间歇性相对炎热的气候(图 4).

现今世界上的亚热带气候可分为 3 类:亚热带地中海气候、亚热带季风性气候、亚热带干旱草原与荒漠气候.从木化石年轮分析结果可以看出,木材的晚材率都较低(图 3),表明当时晚材生长的秋冬季气候寒冷干旱,这与亚热带地中海型冬季温和多雨的特征明显不同.此次所采集的木化石样品茎干都比较粗大(图 2a),为高大的乔木,说明当时植被非常繁盛,不可能为亚热带干旱草原与荒漠气候.从 1302~1307 号木化石,它们的平均敏感度变化较大,多为敏感序列,但中间间歇性出现满足序列,敏感度平均值高达 0.4(表 1).较高的平均敏感度以及其强烈的变化,反映当时的大气降水量有很大的变化,表明研究区在中二叠世处在强烈的季风影响下,为亚热带季风性气候.塔尔朗组中常见的冲刷构造(图 4)以及植物茎干碎片,可能就是由于季节性的水流输入造成的.

1302 号及 1305 号木化石的平均敏感度 $<0.3$ (表 1),为满足序列,表明它们生长时年水分供给均匀、充足.但它们的连续年轮宽度仍然有明显的宽窄变化(图 3),说明气候整体较为湿润,降水充足,但也具有干旱—半干旱的波动(图 4).13031 号、1304 号以及 1307 号样品中伪年轮的存在,也反映树木生长期间受外界环境扰动的影响强烈.

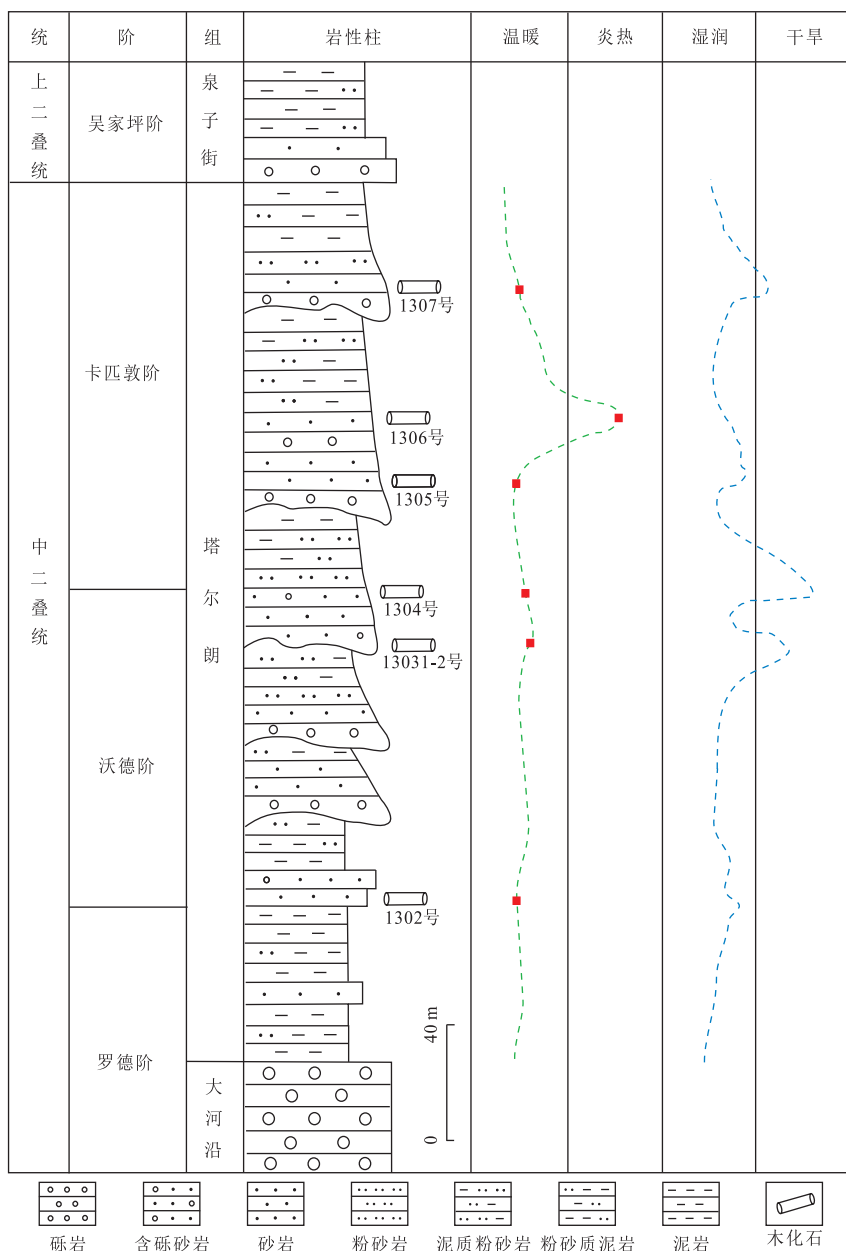


图 4 研究区中二叠世古气候演化

Fig.4 The paleoclimate evolution of study area during the Middle Permian

据吴绍组(1996)修改

## 5 结论

(1)吐哈盆地北东缘中二叠统塔朗组中年轮明显与不具年轮的两种木化石的混生,表明该区中二叠世可能处于温带向热带过渡的亚热带。气候整体相对温暖,但出现过间歇性相对炎热的气候。

(2)木化石的年轮宽度及晚材率与现代北亚热带木材更为类似,说明其当时主要生长在夏季与冬季温差变化较大、季节性更明显的北亚热带。年轮数据统计结果表明,树木生长时期季节性非常明显,夏

季湿热,冬季干冷,属于典型的亚热带季风型气候。

(3)木化石较高的平均敏感度( $MS$  平均可达 0.4),显示树木生长期间受季风气候的影响,环境非常不稳定,每年大气降水量有很大的变化。大多数木化石样品连续年轮宽度的宽窄不一以及伪年轮的存在,表明当时气候变化频繁,整体较为湿润,但也具有干旱一半干旱的波动。

致谢:中国地质调查局油气资源调查中心的赵省民研究员也参与了样品的野外采集工作,在此表示衷心的感谢。

## References

- Artabe, A.E., Spalletti, L.A., Brea, M., et al., 2007. Structure of a Conifer Fossil Forest from the Late Triassic of Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243(3–4): 451–470. doi: 10.1016/j.palaeo.2006.08.011
- Barron, E.J., 1985. Numerical Climate Modeling, a Frontier in Petroleum Source Rock Prediction: Results Base on Cretaceous Simulations. *AAPG Bulletin*, 69(3): 448–459. doi: 10.1306/AD46250B–16F7–11D7–8645000102C1865D
- Deng, B.Z., Yu, L.X., Wang, Y.B., et al., 2015. Evolution of Marine Conditions and Sedimentation during the Permian-Triassic Transition in Chibi of Hubei Province. *Earth Science*, 40(2): 317–326 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Q.H., Fu, X.P., Li, Y., et al., 2010. Late Mesozoic Fossil Woods from Southeastern Mongolia. *Global Geology*, 29(4): 527–542 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Q.H., Zhang, W., Zheng, S.L., 2004. Growth Rings Observation on Fossil Woods and Their Implication from Yixian Formation of Lower Cretaceous in Western Liaoning Province. *Geological Science and Technology Information*, 23(1): 38–41 (in Chinese with English abstract).
- Falcon-Lang, H.J., 2005. Global Climate Analysis of Growth Rings in Woods, and Its Implications for Deep-Time Palaeoclimate Studies. *Paleobiology*, 31(3): 434–444. doi: 10.1666/0094–8373(2005)031[0434;GCAOGR]2.0.CO;2
- Feng, X.H., Cheng, R.M., Xiao, W.F., et al., 2011. Effects of Air Temperature in Growth Season on Masson Pine (*Pinus Massoniana*) Radial Growth in North Subtropical Region of China. *Chinese Journal of Ecology*, 30(4): 650–655 (in Chinese with English abstract).
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 23–56.
- Fu, Y.L., 2003. Study on the Wood Anatomy of Chinese Fir in Different Growth Environment (Dissertation). Guangxi University, Nanning (in Chinese with English abstract).
- Han, Y.L., 2000. Palaeogeography of the Permian in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 18(4): 330–334 (in Chinese).
- Jin, C.D., Wu, Y.Q., Jin, S.Z., et al., 2001. The Wood Structure of Red Pine under Different Environmental Condition. *Journal of Northeast Forestry University*, 29(3): 21–24 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., 2004. Middle Permian Fossil Wood from Hulusitai in Inner Mongolia, with Reference to Palaeoclimate (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Wu, S.Z., Qu, X., et al., 2002. Key Climatic Events during Carboniferous-Triassic in Junggar. *Xinjiang Geology*, 20(3): 192–195 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Liang, E.Y., Shao, X.M., 2008. Variations of *Picea Crassifolia* Tree-Ring Cell Structure and Their Implications to Past Climate in Eastern Margin of Qaidam Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(3): 524–532 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.A., Cheng, G.L., Li, Q., et al., 1992. Paleo-Magnetic Study of the Eastern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 10(4): 329–371 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.F., 1992. Discovery of the Permian-Triassic Strata in the Kulai, Hami, Xinjiang Province and Their Significance. *Journal of Northwest University*, 22(2): 209–218 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L.J., Yao, Z.Q., 1996. Early Late Permian Ang-Ara Flora from Turpa-Hami Basin. *Acta Palaeontologica Sinica*, 35(6): 644–671 (in Chinese with English summary).
- Liu, Y.L., Liu, Y.Q., 2004. The Distribution and Significance of Lucaogou Formation of Permian in Santanghu Basin. *Northwestern Geology*, 37(2): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.Q., Feng, Q., Zhou, L.F., et al., 2002. Oil-Bearing Concretion Research and Prospect of Oil Analysis of Permian in Tuha Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 23(5): 40–43 (in Chinese).
- Liu, Y., Shi, J.F., Shishov, V., et al., 2004. Reconstruction of May-July Precipitation in the North Helan Mountain, Inner Mongolia since AD 1726 from Tree-Ring Late Wood Widths. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 405–409. doi: 10.1007/BF02900325
- Lu, C.X., Xu, F., Qin, Y.L., et al., 2012. Variation Studies on Late Wood Percentage, Tree-Ring Width and Tissue Proportion of *Pinus Massoniana* Plantation. *Guangxi Forestry Science*, 41(2): 81–85 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang, S., Wang, Z., Zhan, J.Z., et al., 2003. Palynology of the Carboniferous and Permian Strata of Northern Xinjiang, Northwestern China. University of Science and Technology of China Press, Hefei (in Chinese).
- Pires, E.F., Guerra-Sommer, M., 2011. Growth Ring Analysis of Fossil Coniferous Woods from Early Cretaceous of Araripe Basin. *An Acad Bras Cienc*, 83(2): 409–23. doi: 10.1590/S0001–37652011005000005
- Qian, L.J., Shi, Z.Q., Li, Z.W., et al., 2010. Fossil Wood of the Upper Triassic Xujiahe Formation on the Western Margin of Sichuan Basin: Implication for Palaeoclimate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(2): 324–330 (in Chinese with English abstract).



- with English abstract).
- Rees, P. M., Gibbs, M. T., Ziegler, A. M., et al., 1999. Permian Climates: Evaluating Model Predictions Using Global Paleobotanical Data. *The Geological Society of America*, 27(10): 891—894. doi: 10.1130/0091—7613(1999)027<0891:PCEMPU>2.3.CO;2
- Taylor, E. L., Ryberg, P. E., 2007. Tree Growth at Polar Latitudes Based on Fossil Tree Ring Analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 255(3—4): 246—264. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.06.013
- Wang, C. G., Yang, B., 2004. Prospects of Hydrocarbon Exploration of Permian in Turpan-Hami Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(1): 17—18 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Shao, X. M., Fang, X. Q., et al., 2011. Responses of Pinus Koraiensis Tree Ring Cell Scale Parameters to Climate Elements in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(10): 2643—2652 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Yu, D., Li, J. F., et al., 2003. Advances in Research on the Relationship between Climatic Change and Tree-Ring Width. *Acta Phytocologica Sinica*, 27(1): 23—33 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. Z., 1996. Paleoclimate of Lower Permian in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 14(3): 270—277 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. Z., 1998. Paleoclimatic Discussion on Carboniferous-Permian Oil-Generating Strata in the Northern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 16(1): 58—68 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. D., 1990. Tree Rings and Climate Change. China Meteorological Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, J. L., Liu, Y. X., Liu, Y. Q., et al., 2013. Sedimentology and Basin Evolution of the Early Permian Yierxitu Formation in Turpan-Hami Area, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(2—3): 424—442 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B., 2010. Restoration of the Paleoenvironment of Late Paleozoic in Eastern Xinjiang (Dissertation). Shandong University of Science and Technology, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Yuan, M. S., 1998. Oil-Gas Distribution Characteristics and Exploration Strategy in Turpan-Hami Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 19(2): 106—111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. B., Cheng, G. D., Yao, T. D., et al., 2003. A 2, 326 Year Tree-Ring Record of Climate Variability on the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 30(14): 1739—1742. doi: 10.1029/2003GL017425
- Zhang, X. H., Li, D. W., Yuan, Y. M., et al., 2003. Discovery and Geological Significance of Jurassic Fossil Wood in Dingri Area, Tibet. *Earth Science*, 28(1): 20—21 (in Chinese).
- Zheng, H. R., Hu, Z. Q., 2010. Pre-Mesozoic Tectonic Lithofacies Paleogeographic Atlas of Chinese. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ziegler, A. M., 1990. Phytogeographic Patterns and Continental Configurations during the Permian Period. *Geological Society, London, Memoirs*, 5(12): 363—379.

### 附中文参考文献

- 邓石柱, 余黎雪, 王永标, 等, 2015. 湖北赤壁二叠纪—三叠纪之交古海洋沉积环境演化. *地球科学*, 40(2): 317—326.
- 丁秋红, 傅晓平, 李勇, 等, 2010. 蒙古东南部晚中生代木化石. *世界地质*, 29(4): 527—542.
- 丁秋红, 张武, 郑少林, 2004. 辽西下白垩统义县组化石木年轮的观察及其意义. *地质科技情报*, 23(1): 38—41.
- 封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等, 2011. 北亚热带生长期温度对马尾松径向生长的影响. *生态学杂志*, 30(4): 650—655.
- 符韵林, 2003. 不同生长环境的杉木木材解剖研究 (硕士学位论文). 南宁: 广西大学.
- 韩玉玲, 2000. 新疆二叠纪古地理. *新疆地质*, 18(4): 330—334.
- 金春德, 吴义强, 金顺泽, 等, 2001. 不同生长环境赤松木材构造的变异. *东北林业大学学报*, 29(3): 21—24.
- 李萍, 2004. 内蒙古呼鲁斯台中二叠世木化石及古生态研究 (硕士学位论文). 西安: 西北大学.
- 李强, 吴绍祖, 屈迅, 等, 2002. 试论准噶尔石炭纪—三叠纪重要气候事件. *新疆地质*, 20(3): 192—195.
- 李雁, 梁尔源, 邵雪梅, 2008. 柴达木盆地东缘青海云杉树轮细胞结构变化特征及其对气候的指示. *应用生态学报*, 19(3): 524—532.
- 李永安, 程国良, 李强, 等, 1992. 新疆东部古地磁研究. *新疆地质*, 10(4): 329—371.
- 刘洪福, 1992. 新疆哈密库莱二叠—三叠纪地层的发现及其意义. *西北大学学报自然科学版*, 22(2): 209—218.
- 刘陆军, 姚兆奇, 1996. 吐鲁番—哈密盆地晚二叠世早期植物群. *古生物学报*, 35(6): 644—671.
- 刘延莉, 柳益群, 2004. 三塘湖盆地二叠纪芦草沟组分布及其意义. *西北地质*, 37(2): 36—41.
- 柳益群, 冯乔, 周立发, 等, 2002. 吐哈盆地二叠系含油结核研究及生油前景分析. *石油学报*, 23(5): 40—43.
- 卢翠香, 徐峰, 覃引鸾, 等, 2012. 人工林马尾松晚材率、年轮宽度和组织比量变异研究. *广西林业科学*, 41(2): 81—85.

- 欧阳舒,王智,詹家祯,等,2003.新疆北部石炭纪—二叠纪孢子花粉研究.合肥:中国科学技术大学出版社.
- 钱利军,时志强,李智武,等,2010.四川盆地西缘地区上三叠统须家河组化石木年轮的古气候意义.沉积学报,28(2):324—330.
- 王昌桂,杨飏,2004.吐哈盆地二叠系油气勘探潜力.新疆石油地质,25(1):17—18.
- 王辉,邵雪梅,方修琦,等,2011.长白山红松年轮细胞尺度参数对气候要素的响应.应用生态学报,22(10):2643—2652.
- 王婷,于丹,李江风,等,2003.树木年轮宽度与气候变化关系研究进展.植物生态学报,27(1):23—33.
- 吴绍祖,1996.新疆早二叠世古气候.新疆地质,14(3):270—277.
- 吴绍祖,1998.从古气候探讨新疆北部石炭—二叠纪生油层位.新疆地质,16(1):58—68.
- 吴祥定,1990.树木年轮与气候变化.北京:气象出版社.
- 徐加林,刘燕学,柳永清,等,2013.新疆吐鲁番—哈密盆地北部下二叠统伊尔稀土组的沉积特征与盆地演化.地质通报,32(2—3):424—442.
- 杨彝,2010.东疆地区晚古生代古环境恢复(硕士学位论文).青岛:山东科技大学.
- 袁明生,1998.吐哈盆地油气分布特征及勘探方向.新疆石油地质,19(2):106—111.
- 张雄华,李德威,袁晏明,等,2003.西藏定日一带侏罗系硅化木的发现及其地质意义.地球科学,28(1):20—21.
- 郑和荣,胡宗全,2010.中国前中生代构造—岩相古地理图集.北京:地质出版社.