论文

鄂尔多斯盆地延长组的划分、时代及中-上三叠统界线

邓胜徽^{1,2,3*}, 卢远征^{1,2,3}, 罗忠^{1,2,3}, 樊茹^{1,2,3}, 李鑫^{1,2,3}, 赵怡⁴, 马雪莹¹, 朱如凯^{1,2,3}, 崔景伟^{1,2,3}

1. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室, 北京 100083;

4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

* E-mail: dsh63@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017-06-02; 收修改稿日期: 2018-01-19; 接受日期: 2018-04-18; 网络版发表日期: 2018-07-02

中国石油天然气股份有限公司科技发展部“十二五”项目(编号: 2011A-0206, 2014A-0216)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2014CB239001)资助

摘要 广泛发育于鄂尔多斯盆地及周缘地区的延长组是我国最重要的陆相三叠纪地层之一, 也是鄂尔多斯盆地的主力含油气层系之一, 其时代意见对相关的地质研究和油气勘探均有重要意义. 长期以来, 延长组的时代被归于晚三叠世, 视为中国北方陆相上三叠统的典型代表, 尽管在20世纪中后期已有学者提出延长组的中部应为中三叠统. 在以往资料的基础上, 依据新发现的古生物化石以及新获得的长₇中下部凝灰岩锆高精度测年结果, 认为延长组的中下部(相当于长₇及以下地层)的时代为中三叠世拉丁期, 底部不能排除属于安尼期晚期的可能性; 主力烃源岩长₇油页岩、泥岩的时代为中三叠世拉丁期; 延长组的上部, 即长₆及以上地层的时代属于晚三叠世, 在鄂尔多斯盆地的主体部分普遍缺失晚三叠世晚期地层; 中/上三叠统的界线位于延长组的内部, 大致与长₇和长₆之间的界线相当; 中三叠世拉丁期是鄂尔多斯盆地古环境的重要转折时期, 古环境的转变与秦岭的主构造活动期以及四川盆地的重大环境转折期基本等时, 说明上述构造活动和环境的重大转变可能是相互关联的, 是处于拉丁期同一大地构造背景之下, 构造运动作用的结果.

关键词 延长组, 锆石测年, 时代, 中-上三叠统界线, 构造-环境转变, 鄂尔多斯盆地

1 引言

有关鄂尔多斯盆地延长组生物化石的发现和研究表明, 其历史久远. 最早的化石记载可追溯到宋代沈括在

《梦溪笔谈》之《延州化石》篇中对延州“竹筴化石”(实为新芦木或木贼的茎干)的记述及其古地理环境的推断. 现代科学意义上的地层古生物学研究在19世纪后期也已开始. 1890年代, 俄罗斯学者奥勃鲁契夫

中文引用格式: 邓胜徽, 卢远征, 罗忠, 樊茹, 李鑫, 赵怡, 马雪莹, 朱如凯, 崔景伟. 2018. 鄂尔多斯盆地延长组的划分、时代及中-上三叠统界线. 中国科学: 地球科学, 48: 1293–1311, doi: [10.1360/N072017-00180](https://doi.org/10.1360/N072017-00180)

英文引用格式: Deng S H, Lu Y Z, Luo Z, Fan R, Li X, Zhao Y, Ma X Y, Zhu R K, Cui J W. 2018. Subdivision and age of the Yanchang Formation and the Middle/Upper Triassic boundary in Ordos Basin, North China. Science China Earth Sciences, 61: 1419–1439, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9215-3>

院士在延长组采到了植物化石, 经奥地利古植物学家克拉梭教授 (Krasser, 1900) 鉴定, 其中一块化石被归入 *Danaeopsis* 属, 地层时代确定为三叠纪。中国学者在上世纪初也开启了对鄂尔多斯盆地的地质调查, 并在基础地质研究中取得了重要进展。其中, 关于地层古生物研究最重要的进展是1936年潘钟祥教授对延长层植物群的论述, 共记载了包括 *Danaeopsis hallei* (= *Danaeopsis fecunda*), *Bernoullia* (= *Symopteris*) *zeillerei*, *Todites* (*Cladophlebis*) *shensiensis*, *Thinnfeldia nordenskioldi*, *Th. rhomboidalis* 等在内的15种植物化石, 认为与欧洲晚三叠世考依卜层植物群可以对比, 两者时代相近, 得出了延长层时代为晚三叠世的结论 (潘钟祥, 1936)。

大规模且系统的地质调查工作则是在中华人民共和国成立之后, 特别是伴随油气、煤炭资源等勘探的全面推进而展开的。在地层古生物学研究方面, 影响最大的成果莫过于斯行健教授1956年出版的《陕北中生代延长层植物群》专著。该著共描述了27属62种植物化石, 建立了著名的 *Danaeopsis fecunda*-*Bernoullia* (= *Symopteris*) *zeillerei* 植物群, 进一步明确植物群大致与奥地利的Lunzer-Keuper, 瑞士的Basler-Keuper以及北美的Virginia-Keuper植物群相当, 认为延长层的沉积时间从晚三叠世早期开始, 延续到瑞替期 (斯行健, 1956a)。嗣后, 该植物群及地层的时代意见被广泛接受, 并成为我国判定晚三叠世陆相地层的重要标准, 被大量的地层古生物学论著及古生物学、地史学教科书等所采纳, 成了地学界的常识, 影响至今。

20世纪80年代, 中国地质科学院地质研究所出版了迄今对鄂尔多斯盆地三叠纪地层、古生物最为系统的研究成果。该成果展示了多门类古生物的大量新资料, 特别是对原延长层进行了新的划分: 将原延长层的下部划出, 命名为铜川组, 归于中三叠统; 上部称延长组 (本文称“狭义延长组”), 归上三叠统 (中国地质科学院地质研究所, 1980; 曲立范, 1980; 程政武, 1980; 苏德英等, 1980; 刘本培和李子舜, 1980; 王思恩和刘淑文, 1980; 黄枝高和周惠琴, 1980)。延长层植物群也分为二, 即: 产于下部的, 时代为中三叠世晚期的“铜川组植物群”和产于上部的, 时代为晚三叠世的“延长组植物群” (黄枝高和周惠琴, 1980)。然而, 尽管这一地层时代意见获得了一些认可 (如, 雍天寿, 1984; 陕西省地质矿产局, 1989, 1998), 但并没有得到学界及生产部门

的广泛承认, 在此后的大量研究论著及生产单位的研究报告中, 乃至教科书都依然使用延长组 (包括铜川组和狭义延长组) 归于上三叠统的结论。

延长组是鄂尔多斯盆地重要的产油气地层 (杨俊杰, 2002; 何自新, 2003; 李德生, 2004; 张福礼, 2004; 雷振宇等, 2000; 屈红军等, 2011), 相关的油气勘探始于晚清, 清政府在1905年就筹建了“延长石油官厂”, 20世纪70年代长庆油田建成。当前, 长庆油田已发展为5千万吨级的特大型油气田, 原油主要来自延长组, 但其主力烃源岩长7油页岩、泥岩的时代存在争议。

延长组油气的勘探和突破, 促进了相关地质研究的展开以及新资料的积累, 一系列新的认识逐渐展现。对其中凝灰岩层锆石同位素测年工作取得了一系列新进展, 使得延长组的时代以及中/上三叠统界线问题再度引起了研究和生产部门的关注。一些新的研究结果进一步支持了延长组的时代为中三叠世到晚三叠世的结论, 但主要依据来自同位素年龄测定结果, 不免因测试方法等因素的影响, 所测得的数据较差别甚大或有矛盾的情况 (邓秀芹等, 2008, 2009; 辛补社等, 2013a, 2013b; 王多云等, 2014; 张辉等, 2014)。在新近发表的论著中, 将延长组的时代视为晚三叠世的情况十分普遍 (如, 杨友运, 2004; 武富礼等, 2004; 党犇等, 2007; 付金华等, 2005; 杨斌虎等, 2008; 傅强等, 2009; 赵文智等, 2006; 刘化清等, 2013; 周翔等, 2016; 杨华等, 2016)。

近年, 笔者在中国石油天然气股份有限公司科技发展部的资助下, 对鄂尔多斯盆地三叠系开展了多重地层学研究。在补充岩石地层学、生物地层学研究的同时, 开展了有机碳同位素地层学、天文旋回地层学以及锆石年代学等的研究, 在延长组的时代及中/上三叠统的界线方面获得了一些新的证据, 本文重点展示这一方面的进展。

2 延长组的岩石地层划分

2.1 延长组的定义及其细分

1926年, 外国学者 M.L. Fuller 和 F. G. Clapp 将陕北绥德-延长一带出露的地层命名了“延长相”, 1934年潘钟祥改称“延长层”, 归上三叠统 (杨遵仪等, 2000); 甘克文1959年将“延长统”下分为砂岩段 (T_3y^1)、油页岩段 (T_3y^2)、含油砂岩 (T_3y^3)、含油泥页岩段 (T_3y^4) 和含煤段

(T_3y^5)等岩性段, 奠定了延长组或延长群的基本内涵和内部划分方案(表1). 1980年, 中国地质科学院地质研究所(1980)以铜川漆水河剖面为标准剖面将“延长统”下部另立铜川组, 上部为延长组(本文称狭义延长组). 其中, 铜川组相当于 T_3y^1 加 T_3y^2 , 延长组相当于 T_3y^3 、 T_3y^4 和 T_3y^5 . 后来, 陕西省区域地层表编写组(1983)采纳了铜川组一名, 但将该组之上的地层命名为胡家村组、永坪组和瓦窑堡组, 并将此3个岩组加上铜川组合称为延长群. 该方案为《陕西省区域地质志》(陕西省地质矿产局, 1989)所采纳, 但没有得到普遍的认同. 比如, 《中国地层典·三叠系》(杨遵仪等, 2000)将胡家村组并入了永坪组, 而陕西省地质矿产局在《陕西省岩石地层》中则明确指出原延长组的过细划分在横向上难推广, 仍采用延长组, 废除铜川组、胡家村组和永坪组, 但保留了瓦窑堡组(陕西省地质矿产局, 1998)(表1).

最近, 李亚等(2016)依据中国地质科学院地质研究所(1980)所测剖面资料进行了与前人的划分均不同的重新划分, 将原归入二马营组(=纸坊组)上部的434m地层(70~177层, 漆水河剖面, 下同)改归铜川组(70~248层), 将原铜川组上部(249~266层)分出, 与原延长组的中、下部地层合并为永坪组(249~351层); 原延长组的上部160.4m地层(352~373层)为瓦窑堡组(表1). 作者修改的主要依据是生物化石面貌的变化, 如原二马营组上部的地层因其所产植物化石与铜川组相似而划入后者, 但这段地层中仍发育紫红色泥岩、钙质结核等. 如果按此划分, 原来的铜川组不含紫红沉积, 二马营组(纸坊组)含紫红色的划分标志将失效, 在实际应用中或还不如原来的方便.

综合上述, 对鄂尔多斯盆地中上三叠统的不同划分方案都有其一定的依据, 但也均存在不足, 而从近10余年发表的大量的文献看, 绝大多数文献仍然使用广义的延长组名称和概念, 因此在梳理清楚不同划分方案中各岩组之间对比关系后, 本文仍采用广义延长组一名(图1).

石油勘探部门因油气勘探的需要对延长组作了更为细致的划分, 将延长组按含油性细分为10个油层组, 即: 长₁至长₁₀油层组, 其中第4和5油层组因不容易划分而合为一个油层组看待, 称长₄₊₅油层组(图1).

大量野外考察后可知, 以油页岩为特点的长₇油层组(后文省略为长₇, 其他油层组类推)分布广, 层位稳定, 并含较丰富的生物化石, 包括鱼、叶肢介、双壳

类、昆虫、孢粉和植物等化石, 还发育了全组中层数最多、分布最广的凝灰岩层, 无论是在野外还是在井下均能比较好识别, 可以作为岩石地层单元划分的重要标志. 据铜川组建立的标准剖面——铜川漆水河剖面的描述(中国地质科学院地质研究所, 1980), 何家坊油页岩, 单层油页岩的厚度达27m, 产丰富的鱼和双壳类等化石, 归于铜川组的顶部, 是该组顶界的标志(杨遵仪等, 2000). 而之上的狭义延长组下段以灰、灰绿色厚层块状中粒砂岩为主, 夹泥岩, 厚210~325m(中国地质科学院地质研究所, 1980). 对比于石油勘探部门的划分方案, 显然, 何家坊油页岩属于长₇, 也就是说, 铜川组的顶部包括了长₇, 而狭义延长组的底相当于长₆之底.

2.2 关于安口组

“安口组”一名是长庆油田研究院课题组提出的(杨华等, 2011), 后来在命名者参与的若干文献中有述及(如, 贺静等, 2011; 李振宏等, 2014; 韩鹏等, 2014). 该组建立的理由大致有两条, 其一, 在华亭安口镇三叠系剖面的上部, 出现了“一套河流三角洲相肉红色、灰紫色与黄绿色块状中粗砂岩夹黄绿、灰绿色粉砂质泥岩、煤线及厚砾岩、砾状砂岩”地层, 厚度15.5~1318.1m, 分布于甘肃省华亭县的策底、砚峡、安口及崇信县新窑一带; 其二, 该套地层中所产植物化石组合中既无晚三叠世延长植物群的代表分子, 亦无侏罗纪植物群的典型分子, 层位高于鄂尔多斯盆地内部产延长植物群的延长组, 从而补充了鄂尔多斯盆地晚三叠世的地层发育序列(韩鹏等, 2014), 可与六盘山盆地窑山组对比(杨华等, 2011). “安口组”下与延长组整合接触, 上与侏罗系延安组为平行不整合接触.

据笔者的观察, “安口组”无建立必要, 理由也有二. 其一, 从岩性看, 虽然有肉红色砂岩的存在, 但总体岩性及沉积环境与下伏地层(“延长组”)无本质差别, 如细粒的砂泥岩仍然以黄绿色为特点, 仍然夹煤线, 仍然属于潮湿气候背景下的河湖沼泽体系, 是连续沉积发育而来. 而粗颗粒砂岩的肉红色应为局部物源所致, 分布局限, 单独划出意义不大. 其二, 建组者称安口组的植物组合较特别, 时代要晚于延长植物群. 但从作者公布的部分化石图影(杨华等, 2011)看, 这些化石虽然不是延长植物群的代表分子, 却也是延长植物群中的常见分子; 而更为重要的是, 笔者新近的工作在“安口组”的建组剖面上, 于“安口组”的最顶部, 紧贴于侏罗

表 1 鄂尔多斯盆地三叠系划分沿革简表

潘钟祥 (1934)		甘克文 (1959) ^{a)}		谢秋元等 (1974) ^{b)}		中国地质科学院 地质研究所(1980)		陕西省地质矿产 局(1989)		陕西省地质矿产 局(1998)		杨遵仪等 (2000)		李亚等 (2016)		本 文																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
下侏罗纪	瓦窑堡煤系	侏罗系		侏罗系		侏罗系		侏罗系		侏罗系		侏罗系		侏罗系		侏罗系																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		上三叠系 延长统	T ₃ y ⁵	上三叠统	延长组	上三叠统	延长群	瓦窑堡组	上三叠统	瓦窑堡组	上三叠统	瓦窑堡组	上三叠统	永坪组	瓦窑堡组	上三叠统	长 ₁₋₆																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
			T ₃ y ⁴															T ₃ y ³	中段	下段																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
			T ₃ y ²															T ₃ y ²	铜川组	上段	铜川组	中三叠统	延长组	铜川组	中三叠统	长 ₇																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
																											T ₃ y ¹	T ₃ y ¹	中三叠统	下段	中三叠统	长 ₈₋₁₀																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
三叠纪	延长层	上三叠系 延长统	T ₃ y ⁴	上三叠统	延长组	上三叠统	延长群	永坪组	胡家村组	上三叠统	瓦窑堡组	上三叠统	永坪组	瓦窑堡组	上三叠统	长 ₁₋₆																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
			T ₃ y ³														中段	下段																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			T ₃ y ²														T ₃ y ²	铜川组	上段	铜川组	中三叠统	延长组	铜川组	中三叠统	长 ₇																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
			T ₃ y ¹														T ₃ y ¹	中三叠统	下段	中三叠统	长 ₈₋₁₀																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
三叠纪 —— 二叠纪	石千峰系	中下三叠纪	纸坊组	中三叠统	纸坊组	上段	二马营组	上段	下段	二马营组	二马营组	二马营组	二马营组	二马营组	二马营组	纸坊组																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
																	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段	下段

椎动物、湖生无脊椎动物和中、晚三叠世的植物、孢粉化石等最为突出。除了植物化石经潘钟祥(1936)和斯行健(1956a)在上世纪中期以前系统研究外,其他门类以上世纪中后期的成果为主(杨钟健, 1961; 刘宪亭, 1962; 钟小春, 1964; 曲立范, 1980; 黄枝高和周惠琴,

1980; 苏德英等, 1980; 刘本培和李子舜, 1980; 王思恩和刘淑文, 1980; 程政武, 1980; 孙艾玲, 1980; 苏德造, 1984, 1999). 近年, 又有一些新成果面世(刘俊等, 2001; 王永栋等, 2003; 江德昕等, 2006; 吉利明等, 2006; Li等, 2008; Wu等, 2001; Liu, 2015; Liu和Abdala, 2015; Liu和Sullivan, 2017).

3.1 延长组植物群及其组合划分

延长组植物化石归为延长植物群，命名的 *Danaeopsis-Bernoullia* 植物群(斯行健和周志炎, 1962)。其中, *Bernoullia* 属名由古植物学家Heer于1877年首先应用于瑞士三叠系中的一种蕨类化石 *Bernoullia helvetica*, 但后来发现, *Bernoullia* 一名早在1873年已被现代植物学家Oliver用于现生被子植物木棉科的一种植物 *Bernoullia flammea*。因此, 根据生物命名的优先法则, 三叠纪的化石植物属名无效, 须重新定名。徐仁教授据这一情况重新命名为 *Symopteris* 属(徐仁等, 1979), 本文采纳, 改称 *Danaeopsis-Symopteris* 植物群。

*Danaeopsis-Symopteris*植物群的时代原归晚三叠世。黄枝高和周惠琴(1980)划分出铜川组(相当于本文长₁₀至长₇)植物群, 时代为中三叠世晚期; 狭义延长组(相当于本文长₆至长₁)植物群时代为晚三叠世(表2), 并得到其他生物门类的支持(曲立范, 1980; 程政武, 1980; 苏德英等, 1980; 刘本培和李子舜, 1980)。本文的新发现支持了黄枝高和周惠琴(1980)的意见, 但将延长组所产植物化石作为一个植物群看待, 划分为两个植物组合, 即延长组下部(相当于长₁₀至长₇)为一个植物组合, 命名为*Symopteris-Danaeopsis magnifolia*组合, 时代归中三叠世晚期, 大致为拉丁期; 延长组上部(相当于长₆至长₁)为另一个组合, 称*Thinnfeldia-Danaeopsis fecunda*组合, 时代为晚三叠世(图1, 表2)。

3.1.1 *Symopteris-Danaeopsis magnifolia*组合及时代

该组合的主要特点是: 属种不甚丰富, 相对于晚期组合要单调一些; 存在较多较古老型分子, 如 *Pleuro-*

图 2 鄂尔多斯盆地延长组露头

(a) 陕西陇县窑场沟剖面长₈砂岩夹泥岩, 产 *Annalepis* sp., *Linguiifolium* sp. 等植物化石; (b) 甘肃崇信汭河剖面长₇下部泥岩中所夹凝灰岩层; (c) 陕西耀县瑶曲剖面长₇下部泥岩夹薄层凝灰岩, 产 *Pleuromeia* sp., *Annalepis zeilleri* 等植物化石; (d) 陕西耀县瑶曲剖面长₇油页岩, 夹大量薄层凝灰岩; (e) 甘肃华亭安口剖面延长组与侏罗系界线, 箭头指示处发现 *Danaeopsis fecunda*, *Symopteris zeilleri* 等植物化石; (f) 甘肃崇信汭河剖面长₄₊₅泥岩夹一凝灰岩薄层(箭头标示处)

meia、*Tongchuanophyllum*、*Glossopteris* 等。这些分子指示了较老的时代, 为中三叠世晚期; 延长植物群的一些重要分子, 如 *Symopteris zeilleri*、*Danaeopsis magnifolia*、*D. marantacea*、*D. plana*、*Todites shensiensis*、*Glossophyllum shensiensis* 均已经出现并占据了较重要位置。本次研究还新发现了一些重要分子, 简述如下:

(1) 在陕西陇县窑场沟剖面长₈泥岩(图2a)、耀县瑶曲剖面长₇下部(图2c)和甘肃华亭剖面长₇等层位中发现了 *Annalepis* 化石, 至少包括了 *Annalepis zeilleri* Fliche(图3d、e)和一个未定种(*Annalepis* sp.)(图3a~c)。

Annalepis 属最早发现于法国东北部洛林(Lorraine)地区中三叠统(Fliche, 1910; Grauvogel-Stamm和Duringer, 1983), 后在德国(Kelber, 1990; Mader, 1990), 中亚的哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦(Brick, 1952; Moisan和Voigt, 2013)以及俄罗斯地台和西伯利亚地区广泛产出(Dobruskina, 1985; Sadovnikov, 1982)。在我国, 该属以往发现于华南的鄂西、长江中下游地区中三叠统(叶美娜, 1979; 孟繁松, 1993, 1998; 孟繁松等, 2000)和滇东黔西地区下三叠统(喻建新等, 2008; Yu等, 2010), 新疆准噶尔盆地克拉玛依组的下部(史晓等, 2014)以及华北中下三叠统和尚沟组、二马营组(纸坊组)(王喜

图 3 新发现于延长组代表性植物化石

(a)~(c) *Annalepis* sp.; (d)、(e) *Annalepis zeilleri*; (f) *Linguifolium* sp.; (g) *Pleuromeia* sp.; (h) *Danaeopsis fecunda*; (i) *Symopteris zeilleri*; (a)~(c)、(f) 产于陕西陇县窑场沟剖面长₈; (d)、(e)、(g) 产于陕西耀县瑶曲剖面长₇下部; (h)、(i) 产于甘肃华亭安口延长组最顶部. 比例尺=1cm

富, 1984; 黄枝高和周惠琴, 1980; 王自强, 1984; 王自强和娄云云, 1990)等. 所有产出层位均为中下三叠统, 迄今未见产于上三叠统的可靠报道, 所以, *Annalepis*属在长₈以及长₇底部的存在, 有力地证明其层位应归于中

三叠统.

(2) *Pleuromeia*属化石在长₈的发现进一步说明其时代为中三叠世. 据黄枝高和周惠琴(1980)的记述, 在铜川何家坊铜川组中上部(相当于本文长₇底部)发现过

表 2 中国北方典型地区中、晚三叠世植物群对比表

年代地层		鄂尔多斯盆地				六盘山盆地		准噶尔盆地	
		地层		植物群	植物组合	地层	植物组合	地层	植物组合
上三叠统	瑞替阶					延长组	Neoannularia-Neocalamites组合	郝家沟组	Hausmannia-Clathropteris minoria
	卡尼阶，诺利阶	延长组	长 ₁	Danaeopsis-Symopteris	Thinnfeldia-Danaeopsis fecunda				Danaeopsis-Cladophlebis ichunensis
			长 ₆ ~长 ₂					Symopteris-Danaeopsis magnifolia	
中三叠统	拉丁阶		长 ₁₀ ~长 ₇						克拉玛依组
	安尼阶	纸坊组	Pleuromeia-Scytophyllum-Voltzia	Pleuromeia wuziwanensis-Scytophyllum wuziwanensis	纸坊组				

勒木属的两个种, *Pleuromeia labiata*和*P. tongchuanensis*. 但由于只有茎干营养部分的化石, 有学者提出质疑 (如, 孟繁松等, 2000). 笔者在耀县瑶曲剖面长₇下部和陇县窑场沟剖面长₈. (图2a、c)中发现了*Pleuromeia*属的大孢子叶化石(图3g), 进一步确认了该属在这些地层中的存在. *Pleuromeia*是欧亚早中三叠世的重要化石, 大多出现在早三叠世, 少量延伸至中三叠世, 我国以往主要发现于下三叠统及中三叠统的下部(Retallack, 1975; 王立新等, 1978; Grauvogel-Stamm和Lugardon, 2001; Wang和Wang, 1982; 孟繁松, 1993; 孟繁松等, 2000; 孟繁松和李旭兵, 2002; 史晓等, 2014), 而迄今未曾在上三叠统中发现过.

(3) 在陇县窑场沟剖面的长₈泥岩中还发现大量的可能属于*Linguifolium*的标本(图3f). *Linguifolium*属是冈瓦纳型植物, 以往只发现于南半球的澳大利亚、新西兰、阿根廷和南非等地, 主要分布于下三叠统安尼期到晚三叠世地层中(Retallack, 1980; Pattemore等, 2015). 结合前人在延长组下部(铜川组)及下伏地层中发现的*Glossopteris*及*Gangamopteris*, *Neoglossopteris*, *Neoglossotheca*等冈瓦纳型分子(黄枝高和周惠琴, 1980), 该属的存在也指示时代较老.

以上新的证据均进一步说明, 延长组下部(铜川

组)所产植物组合的时代为中三叠世, 而不会是晚三叠世.

本组合以往的记录及笔者的发现, 有多种*Danaeopsis*, 包括*D. magnifolia*、*D. marantacea*和*D. plana*等, 但是, *D. fecunda*一种未见到或至少不普遍. 据最近研究, 欧洲中、上三叠统的*Danaeopsis*可划分为4个有效种, 各种所代表的时代不完全一致, 但仅*D. fecunda*一种分布限于上三叠统 (Kustatscher等, 2012). 这也佐证了本组合的时代较老.

3.1.2 *Thinnfeldia-Danaeopsis fecunda*组合及时代

本组合产于延长组上部(狭义延长组, 或T₃y³⁻⁵, 或长₁₋₆). 主要分子包括楔叶类的*Equisetites sarrani*、*E. acanthodon*、*E. brevidentatus*、*E. sthenodon*、*E. rugosus*、*Neocalamites carcinoides*、*Neoannularia* sp.; 真蕨类的*Danaeopsis fecunda*、*D. magnifolia*、*D. plana*、*D. sp.*, *Symopteris zeilleri*、*Asterotheca szeiana*、*Todites shensiensis*、*Cladophlebis ichunensis*、*Cl. gigantea*、*Cl. grabauiana*、*Cl. glacialis*、*Cl. kaoiana*、*Cl. stenophylla*、*Cl. raciborskii*、*Sphenopteris chowkiawanensis*; 种子蕨的*Thinnfeldia alethopteroides*、*Th. rigida*、*Th. rhomboidalis*、*Th. ensifolium*、*Th. major*、*Th.*

sp.; 苏铁类的 *Nilssonia orientalis*、*N. pterophylloides*、*N. sp.*、*Anomozamites loczyi*、*Pterophyllum crassinervium*、*Sphenozamites changi*、*Yungienophyllum grandifolium*、*Drepanozamites?* sp.、*Otozamites megaphyllum*、*O. sp.*、*Taeniopteris magnifolia*、*Taeniopteris sp.*; 银杏类的 *Sphenobaiera sp.*、*Glossophyllum?* *shensiensis*、*Ginkgoites chowi*、*G. magnifolia*; 松柏类的 *Podozamites lanceolatus*、*Swedenborgia cryptomerioides*, 及一些分类不明的器官化石. 该组合以出现大量新型分子为特点, 分异度明显升高; 以楔叶类、真蕨类占主导, 真蕨类以紫萁科和可能属于该科的 *Cladophlebis* 占优势; 另一个特点是种子蕨的 *Thinnfeldia* 化石很丰富, 分异度高; 而前一组合中存在的古老型分子, 如石松类等, 则均未再见及. 本组合与欧洲考依卜植物群可以对比, 时代也大致相当, 可能为卡尼期到瑞替期早期.

本植物组合属于晚三叠世的时代意见无明显异议, 但时代上限的意见存在分歧或难做出明确的判定. 斯行健(1956a)通过与南方晚三叠植物群的对比认为没有延续到晚三叠世最晚期, 本文同意这一观点, 补充如下理由.

经过近20年的研究, 在中国北方地区发现了一个三叠-侏罗纪植物群的过渡组合, 这一情况与东格陵兰(Harris, 1937)有些类似. 该过渡性植物组合的特点是“既无晚三叠世延长植物群的典型分子又无侏罗纪植物群的代表分子”, 代表性地区有两个. 一是鄂尔多斯西缘的六盘山盆地, 因其中存在延长组上部和四川上三叠统才出现的 *Neoannularia*(王喜富, 1977), 可称 *Neoannularia-Neocalamites* 组合(表2), 但未见到延长植物群的典型分子 *Danaeopsis fecunda*、*Symopteris zeilleri*、*Todites shensiensis*、*Cladophlebis ichunensis* 等, 也未见到侏罗纪植物群的 *Coniopteris*、*Phoenicopsis* 等, 共生的孢粉为 *Aratrisporites scabratus*、*Taeniaesporites*、*Chasmatosporites* 组合, 时代归于晚三叠世(邓胜徽和厉大亮, 1998; 傅智雁和袁效奇, 1998). 第二是新疆乌鲁木齐郝家沟剖面. 经过10余年的研究, 在连续发育的剖面上建立了晚三叠世到中侏罗世的5个植物组合, 比较清楚地反映了中国北方地区晚三叠世植物群向侏罗纪植物群的演变历程(邓胜徽等, 2000; Deng等, 2010). 其中, 在晚三叠世延长植物群代表分子 *Danaeopsis* 的最高产出层位之上, 早侏罗世代

表分子 *Todites princeps* 出现层位之下约180m地层中发育了一个过渡型的植物组合, 即 *Hausmannia-Clathropteris minoria* 组合(Deng等, 2010). 有机炭同位素的研究, 并与国际三叠/侏罗系界线层型剖面的负偏事件对比, 表明该植物组合属于晚三叠世最晚期(Deng等, 2010). 这一过渡性植物组合在鄂尔多斯盆地范围内不存在, 说明该盆地三叠系顶部有地层缺失(表2).

3.2 延长组孢粉植物群组合划分及时代

鄂尔多斯盆地三叠纪的孢粉研究始于1960年代, 曲立范(1980)对该时期的工作进行了系统总结, 首次建立了包括和尚沟组、二马营组、铜川组和狭义延长组在内的孢粉序列; 此后, 曲立范(1982)又报道了山西交城的刘家沟组孢粉组合, 至此基本建立了完整的三叠纪孢粉组合序列. 曲立范等(1983, 1987)对华北地区三叠系孢粉进行了综述, 认为铜川组(延长组下部)孢粉与下伏二马营组(纸坊组)相似, 属于 *Punctatisporites-Chordasporites* 组合, 主要特征包括: 蕨类植物孢子以 *Punctatisporites* 居多, 其次为 *Verrucosisporites*、*Lophotritetes*、*Apiculatisporis*、*Calamospora* 等, 单缝孢有 *Marattisporites*、*Aratrisporites*, 裸子植物花粉以无肋纹双囊类为主, 出现少量具肋纹双囊类 *Chordasporites* 和单气囊类, 时代为中三叠世. 狭义延长组属于 *Dictyophyllidites-Apiculatisporis-Lueckisporites triassicus* 组合, 与铜川组(延长组下部)孢粉的主要区别在于: (1) *Punctatisporites* 的含量显著降低, 普遍出现了 *Dictyophyllidites*、*Osmundacidites*, 蕨类孢子更加多样化; (2) 新出现一批常见于晚三叠世的分子, 如 *Duplexisporites*、*Limatulasporites*、*Zebrasporites* 等, 时代为晚三叠世. 此观点得到苗淑娟(1983)的支持. 刘兆生等(1981)也认为铜川组(延长组下部)与下伏二马营组(纸坊组)的孢粉较相似, 与狭义延长组的孢粉组合明显不同, 但基于两者共同出现了一些常见于晚三叠世的代表性分子, 仍然将铜川组和狭义延长组同归于晚三叠世. 张祖辉等(1982)持相同的观点.

近年, 吉利明等(2006)和邓秀芹等(2009)根据钻井剖面的分析, 发现长₈与长₇之间孢粉特征发生了重要转变, 因而将长₈与长₇分别归于中、晚三叠世. 其他尚有少量文献报道了延长组及相当地层的孢粉化石, 但未涉及延长组下部(傅智雁和袁效奇, 1998; 王永栋等, 2003; 江德昕等, 2006).

笔者对鄂尔多斯盆地西部及走廊地区的15条中、上三叠统剖面进行了孢粉分析, 获得了丰富资料, 综合前人文献, 认为延长组的孢粉植物群可以分为两个组合(图1、4).

3.2.1 *Punctatisporites*-*Aratrisporites*-*Verrucosisporites*组合

该组合产于广义延长组的下部(长₁₀~长₈), 组合特征包括: (1) 蕨类孢子与裸子植物花粉的含量分别在30~70%变动, 互有消长. (2) 蕨类孢子中以光面三缝类孢子、单缝类孢子、瘤面三缝孢子占优势. 光面三缝类孢子以*Punctatisporites*为代表, 还包括*Calamospora*、*Todisporites*、*Leiotriletes*等属, 它们的合计含量占10%以上, 占蕨类植物孢子的30%以上. 单缝孢子以*Aratrisporites*为主, 含量约10%, 还包括少量的*Laevigatosporites*、*Marratisporites*等. 具刺瘤纹饰的孢子包括*Verrucosisporites*、*Lophotriletes*、*Apiculatisporis*和*Planisporites*等. 其他蕨类孢子含量较低, 常见的有: 具颗粒纹饰的*Granulatisporites*、*Cyclogranisporites*、*Osmundacidites*等, 具环类型的*Kraeuselisporites*、*Kyrto-misporis*、*Annulispora*、*Asseretospora*、*Limatulasporites*等, 其他常见的还有*Retusotriletes*、*Lundbladispore*等. (3) 裸子植物(包括种子蕨)花粉中以本体无肋纹双气囊类型松柏类花粉和具单沟的银杏-苏铁类花粉为主, 各占花粉总量的30~40%. 本体具肋纹的双气囊花粉约占花粉总量的5~10%, 常见*Striatites*、*Striatopodocarpites*、*Lueckisporites*、*Parataeniaesporites*、*Taeniaesporites*、*Chordasporites*等. 单气囊花粉类含量很低(<5%), 包括*Cordaitina*、*Florinites*、*Accinctisporites*等属.

与曲立范(1980)和刘兆生等(1981)的论述相比, 最重要的区别在于单缝孢*Aratrisporites*的含量有明显不同. 在前人的文献中, 蕨类孢子以*Punctatisporites*和*Verrucosisporites*居多, 而*Aratrisporites*含量较低, 并未能引起注意; 而在笔者的资料中, 在很多剖面延长组的下部(铜川组)都见到高含量的*Aratrisporites*, 几乎与*Punctatisporites*和*Verrucosisporites*并驾齐驱, 如陕西陇县窑厂沟、淳化泾河、麟游澄水河、铜川漆水河、甘肃崇信安口、华亭尚家塬、华亭策底坡、景泰冬青沟等剖面. 前人通过原位孢子的研究发现*Aratrisporites*属孢子与水韭目脊囊类*Annalepis*植物有关(孟繁松

等, 2000), 笔者在陕西耀县、陇县和甘肃华亭一带的延长群下部发现丰富的*Annalepis*化石, 可见在延长组下部(铜川组)发现高含量的*Aratrisporites*与植物大化石的发现是相吻合的. 而且*Aratrisporites*属的高含量是劳亚大陆中三叠世孢粉的特征之一, 在下伏的纸坊组中含量更高, 如在铜川漆水河剖面纸坊组的个别样品中可达90%.

3.2.2 *Asseretospora*-*Apiculatisporis*-*Chordasporites*组合

该组合产于延长组中上部(长₇~长₁), 主要特征包括:

(1) 蕨类植物孢子与裸子植物花粉含量仍大体相当, 互有高低, 但低者也不少于30%.

(2) 与前一组合相比, 蕨类植物孢子的变化主要有以下几个方面: 一是曾经占据优势的*Punctatisporites*、*Aratrisporites*、*Verrucosisporites*含量显著降低, 虽然仍很常见(约5%), 但已不具有明显优势; 二是孢子类型更加多样化, 尤其具加厚环型孢子分异度较高, 常见的有*Asseretospora*、*Duplexisporites*、*Dictyophyllidites*、*Concavisporites*、*Kraeuselisporites*、*Kyrto-misporis*、*Annulispora*、*Limatulasporites*、*Crassispore*、*Polycingulatisporites*、*Densosporites*、*Triquitriletes*、*Tripartites*等. 与观音座莲科相关的孢子也很常见, 特别是*Apiculatisporis*; 三是出现少量繁盛于侏罗纪的分子, 如*Neoraistrickia*、*Cyathidites*等.

(3) 裸子植物花粉中仍以无肋纹双囊类和单沟类为主, 与上一组合区别在于具肋纹双囊类中肋纹较多的类型进一步减少, 而具单肋纹的*Chordasporites*却更为常见. 此外, 单气囊类花粉罕见.

与曲立范(1980)的资料相比, 在笔者研究的大多剖面上, *Dictyophyllidites*的含量较低, 仅在同心窑山剖面中稍为常见, 这与该剖面的层位较高有关, 因此笔者在组合名称中使用*Asseretospora*属替代了*Dictyophyllidites*属.

本组合的主要成份为晚三叠世常见分子, 时代应归于晚三叠世.

3.3 延长组其他古生物门类概述

除了植物和孢粉外, 延长组还产丰富的其他门类化石, 前人做了较好的工作, 简要例举主要门类介绍

图 4 延长组孢粉植物群代表分子

1. *Sphagnumsporites* sp., 产于同心窑山剖面窑山组中上部; 2. *Waltzispora* sp., 产于中卫麻黄沟剖面窑山组中下部; 3. *Triquitrites* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₄; 4. *Concavisporites* sp., 产于旬邑山水河剖面长₇; 5. *Apiculatisporis* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₄₊₅; 6. *Lophotriteles* sp., 产于崇信安口剖面长₄₊₅; 7. *Dictyophyllidites* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₇; 8. *Annulispota perforatus*, 产于同心窑山剖面窑山组中上部; 9. *Limatulasporites* sp., 产于铜川漆水河剖面延长组顶部; 10. *Aratrisporites minimus*, 产于陇县窑场沟剖面长₇; 11. *Angiopteridaspora* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₇; 12. *Leiotriteles* sp., 产于同心窑山剖面窑山组中上部; 13. *Punctatisporites* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₇; 14. *Annulispota microannulata*, 产于华亭尚家塬剖面延长组下部; 15. *Retusotriteles* sp., 产于同心窑山剖面窑山组中上部; 16. *Kraeuselisporites* sp., 产于崇信安口剖面长₁; 17. *Kyrtomisporis* sp., 产于宜川仕望河剖面长₇; 18. *Cyathidites* sp., 产于崇信安口剖面长₇; 19. *Asseretospora* sp., 产于同心窑山剖面窑山组中部; 20. *Lundbladispota* sp., 产于崇信安口剖面长₄₊₅; 21. *Triquitrites incisus*, 产于景泰冬青沟剖面南营儿组中部; 22. *Calamospora* sp., 产于铜川漆水河剖面延长组顶部; 23. *Aratrisporites fischeri*, 产于同心窑山剖面窑山组中上部; 24. *Striatoabietes* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₇; 25. *Lueckisporites* sp., 产于铜川漆水河剖面延长组顶部; 26. *Caytonipollenites pallidus*, 产于陇县窑场沟剖面长₇; 27. *Klausipollenites* sp., 产于旬邑山水河剖面长₈; 28. *Verrucosisporites* sp., 产于陇县窑场沟剖面长₈; 29. *Aratrisporites paletae* sp., 产于景泰冬青沟剖面丁家窑组; 30. *Cordaitina gunnyalensis*, 产于崇信安口剖面长₈; 31. *Protohaploxypinus* sp., 产于崇信安口剖面长₃; 32. *Taeniaesporites* sp., 产于铜川漆水河剖面延长组顶部; 33. *Chordasporites* sp., 产于旬邑山水河剖面长₇; 34. *Parataeniaesporites pseudostratus*, 产于陇县窑场沟剖面长₇; 35. *Florinites* sp., 产于崇信安口剖面长₄₊₅

如下。

3.3.1 双壳类

鄂尔多斯盆地延长组的双壳类化石可分为两个组合(刘本培和李子舜, 1980)。一是 *Shaanxiconcha-Unio* 组合, 产于延长组中下部(大致相当于铜川组), 以 *Shaanxiconcha* 达到极度的繁盛、首次出现了 *Unio* 为主要特征, 时代不排除属中三叠世晚期的可能(刘本培和李子舜, 1980)。二是 *Shaanxiconcha-Unio-Sibiriconcha* 组合, 产于延长组的上部, 其中 *Shaanxiconcha clinovata*、*S. tranguata* 极度繁盛, *Unio* 进一步繁荣, 出现了无疑的 *Sibiriconcha*, 与我国新疆、青海、河南, 以及印度等地晚三叠世双壳类组合可以对比, 时代相当(刘本培和李子舜, 1980)。

3.3.2 叶肢介

叶肢介化石主要产于延长组的中上部, 相当于长₈~长₄₊₅的地层。在长₇油页岩(也称张家滩页岩)中尤为丰富, 称 *Euestheria* 组合, 以真叶肢介属(*Euestheria*)极为繁盛为特点, 有近10种之多, 另有 *Howellites*, *Aquilonoglypta* 属等(王思恩和刘淑文, 1980), 时代可能是跨中、晚三叠世。

3.3.3 介形类

延长组的介形类动物群可以划分为两个组合。即延长组下部(铜川组)的 *Darwinula-Tungchunia* 组合及延长组上部的 *Darwinula-Lutkevichinella-Tungchunia* 组合。前者主要由 *Tungchunia* 和 *Darwinula* 两个属组成, 时代被归于中三叠世晚期; 后者为前者的延续和发展, 但属种和化石数量都更加丰富, 并出现了 *Lutkevichinella* 属, 时代归于晚三叠世(苏德英等, 1980)。

4 延长组同位素年代学研究进展

有效的测年技术所获得的精准结果在现代地层学中起到了越来越重要的作用, 特别是对于生物地层划分精度有限, 甚至缺少化石的陆相地层。比如, 著名的热河群的时代从以往的晚侏罗世变更为现今得到普遍认可的早白垩世中晚期, 高精度锆石测年起到了极为重要的作用(Swisher等, 1999)。

精准测年结果主要取决于两个方面, 即测试方法

和测试材料。延长组自下而上不同程度的存在火山凝灰岩夹层(邱欣卫等, 2009), 特别是长₇油页岩中火山凝灰岩层数以百计(图2d), 为延长组年代地层研究提供了丰富的岩浆锆石材料。在测试技术方面, 大量的实践表明, 以锆石 SHRIMP U-Pb 和 ID-TIMS 测年方法的精确度最高, 这也是目前国内外年代地层学界公认的两种重要方法。近年, 针对延长组绝对年龄的研究陆续开展, 并取得了一系列的进展。为便于下文的讨论, 先简要介绍国际地质年代表中三叠系各阶的年龄值情况。

在最新的国际地层委员会发布的国际地质年代表中, 三叠系7个阶及顶底界线的8个年龄值(表3), 其中, 有一半是有测年数据支撑, 另一半为推测结果。

沈树忠研究团队对我国南方5条海相和2条海陆交互相界线剖面岩浆锆石年龄测定所获得的结果(252.17±0.06)Ma(Shen等, 2011)被国际地层委员会接受, 作为印度阶的底界年龄值。郑连弟等(2010)对贵州望谟甘河桥剖面下距安尼阶底界标志化石 *Chiosella timorensis* 仅0.5m处的玻屑凝灰岩锆石采用 SHRIMP U-Pb 法测定, 获得了(247.6±1.4)Ma的数据; 中、美学者联合对贵州关刀剖面 T₁/T₂ 界线上下多层凝灰岩在麻省理工学院采用 ID-TIMS 方法进行了年龄测定, 取得了界线年龄为(247.2±0.01)Ma的结果(Lehrmann等, 2006)。据此, 国际地层委员会采用了247.2Ma作为安尼阶底界年龄值(International Commission on Stratigraphy, 2017)。

拉丁阶底界全球层型是意大利的 Bagolino 剖面。在该剖面 and 匈牙利的 Felsőbóbr 剖面上, 于拉丁阶底界附近均发育有多层火山凝灰岩, 为精确的同位素测年提供了有利的条件。已经获得的结果显示, 从菊石 *Reitziites retzei* 带到 *Eoprotrachyceras curionii* 带, 年龄值为240Ma左右或更大一些(Brack等, 2003, 2005; Mundil等, 2004; Pálfi等, 2003)。因此, 国际地质年代表上拉丁阶底界242Ma的数据是有实际测年结果支撑的。

侏罗系底界全球层型剖面确立于奥地利, 副层型在美国的内华达。晚三叠世晚期-早侏罗世早期, 北美地区属于大西洋大火山岩省的范畴, 火山岩十分发育, 为侏罗系底界年龄的测定提供了物质基础。经过了大量的研究获得了主要为199~202Ma的系列年龄数据(Blackburn等, 2013)。因此, 国际地质年代表中三叠系顶界(201.3±0.2)Ma的年龄值也具有较充分的实测数

表 3 全球三叠纪年代地层划分及界线年龄值^{a)}

地层系统		底界年龄值(Ma)		数据来源
侏罗系	下统	赫塘阶	201.3±0.2	北美(Blackbur等, 2013)
		瑞替阶	208.5	推测结果
三叠系	上统	诺利阶	227	推测结果
		卡尼阶	237	推测结果
		拉丁阶	242	意大利和匈牙利(Brack, 2003)
	中统	安尼阶	247.2	中国贵州(Lehrmann等, 2006; 郑连弟等, 2010)
		奥伦尼克阶	251.2	推测结果
	下统	印度阶	252.17±0.06	中国南方(Shen等, 2011)
二叠系	上统	长兴阶		

a) International Commission on Stratigraphy. 2017. Chronostratigraphic chart, [EB/OL].[2017-05-26] <http://www.stratigraphy.org>

据支持。

延长组长₇和长₈火山凝灰岩最为发育, 并集中于长₈顶部至长₇(图1, 图2)。以往对上述火山凝灰岩层的同位素年龄测定也主要集中于长₇和长₈, 获得了一系列的年龄值(表4)。笔者对崇信纳河剖面长₇中下部较厚一层凝灰岩(图2b)的锆石采用ID-TIMS方法测定的结果显示, 4颗锆石的加权平均年龄值为(239.0±1.8)Ma(图5, 表4)。此外, 对长₇凝灰岩高精度年龄数据还有两组。其一是中国科学院北京古脊椎与古人类研究所刘俊研究员团队(Liu等, 2017)对晋陕交界地区铜川组上部(相当于长₇之下)的凝灰岩采用ID-TIMS方法测得了241.482和241.369Ma的结果(表4); 其二是中国石油勘探开发研究院邹才能等对陕西铜川瑶曲剖面长₇下部凝灰岩采用ID-TIMS方法测得的(241.06±0.12)和(241.558±0.093)Ma的结果(表4)。以上两组数据均由美国麻省理工学院同位素年龄实验室测得。

由表4可知, 当前针对长₇油页岩及其相当地层中所夹凝灰岩夹层的测年数据主要来自锆石激光剥蚀法(LA-ICPMS U-Pb)、SHRIMP U-Pb法和ID-TIMS等3种方法。LA-ICPMS U-Pb法获得数据为205~242Ma, 误差大, 本文不多做考虑。SHRIMP U-Pb法获得的数据为(234.6±6.5)~(241.3±2.4)Ma。其中, 来自山西永和县铜川组上部的个别数据误差比较大(Liu等, 2013), 不过, 原文作者(Liu等, 2017)新近发表的对相同地区相同层位样品采用ID-TIMS方法获得的结果要精确得多(表4)。总的来看, 采用ID-TIMS方法获得的结果为239~241Ma, 数据比较集中, 误差小, 是本文主要采信的数据。对比到国际地质年代表, 长₇油页岩相当于中

三叠统拉丁阶的中下部(表3)。

除了上述测年结果外, 辛补社等(2013a、b)报道了甘肃靖远地区南营儿群(=组)底部的两组SHRIMP U-Pb年龄数据: (244.1±3.8)和(244.9±2.8)Ma。层位比鄂尔多斯盆地长₇要低, 可能与延长组底部或纸坊组顶部相当, 说明延长组的底部有可能下延至中三叠统安尼阶的上部。

5 延长组的时代及中上三叠统界线

据上述的分析, 广义的延长组的时代显然是跨中晚三叠世的。延长植物群也并非原来认为的晚三叠世(潘钟祥, 1936; 斯行健, 1956a), 而至少应分为两个植物组合。下部的*Symopteris-Danaeopsis magnifolia*组合产于长₇及以下地层, 时代为中三叠世拉丁期, 最底部还不能排除为安尼期晚期的可能性。长₇主体为湖相泥岩、油页岩, 其中所含植物大化石稀少, 本次在该层段的下部发现了下组合的重要分子, 说明应归于该组合。长₇底部凝灰岩中测得了年龄值为239~241Ma左右, 说明属于中三叠统拉丁期早期。最近, 中国石油勘探开发研究院与中国地质大学(北京)合作通过旋回地层研究, 认为长₇的顶部仍属拉丁期。上部的*Thinnfeldia-Danaeopsis fecunda*组合产于延长组的上部(长₆及以上层位), 时代属于晚三叠世无争议。因此, 中-上三叠统的界线应置于长₇与长₆之间。与延长组下部对比的甘肃东部南营儿组底部的年龄值达到243Ma或更大, 说明延长组的底部有可能为中三叠世安尼期晚期。

吉利明等(2006)和邓秀芹等(2009)认为长₇与长₈之

图5 延长组同位素测年的结果图

表4 鄂尔多斯盆地及周缘延长组及相当地层锆石测年结果一览表

序号	地点或剖面	层位	方法	实验室	测年结果(Ma)	文献
1	陕西正宁正8井	长 ₇ 油页岩	LA-ICPMS U-Pb	西北大学大陆动力学实验室	242~220, 220~205	张文正等, 2009
2	? (原文未提供)	长 ₇ 底	LA-ICPMS U-Pb	西北大学大陆动力学实验室	228.2±2.0	杨华和邓秀芹, 2013
3	? (原文未提供)	长 ₇ 中上部	LA-ICPMS U-Pb	西北大学大陆动力学实验室	221.8±2.0	杨华和邓秀芹, 2013
4	陕西旬邑宁36井	长 ₇ 油页岩	LA-ICPMS U-Pb	西北大学大陆动力学实验室	236.1±2.7	张辉等, 2014
5	陕西旬邑正8井	长 ₇ 油页岩	LA-ICPMS U-Pb	西北大学大陆动力学实验室	234.3±2.8	张辉等, 2014
6	陕西旬邑正9井	长 ₇ 油页岩	LA-ICPMS U-Pb	西北大学大陆动力学实验室	234.19±2.6	张辉等, 2014
7	山西永和交口	铜川组上段	SHRIMP U-Pb	北京离子探针中心	238.6±2.6	Liu等, 2013
8	山西永和桑壁	铜川组上段	SHRIMP U-Pb	北京离子探针中心	234.6±6.5	Liu等, 2013
9	甘肃靖远宝积山	南营儿组底部	SHRIMP U-Pb	北京离子探针中心	244.1±3.8	辛补社等, 2013a
10	甘肃靖远王家山	南营儿组底部	SHRIMP U-Pb	科廷大学(澳)离子探针中心	244.9±2.8	辛补社等, 2013b
11	甘肃环县北罗36井	长 ₇ 底	SHRIMP U-Pb	北京离子探针中心	241.3±2.4	王多云等, 2014
12	甘肃西峰北庄211井	长 ₇ 底	SHRIMP U-Pb	北京离子探针中心	239.7±1.7	王多云等, 2014
13	山西永和桑壁	铜川组上段	ID-TIMS	美国麻省理工学院	241.482	Liu等, 2017
14	山西永和交口	铜川组上段	ID-TIMS	美国麻省理工学院	241.369	Liu等, 2017
15	陕西铜川瑶曲剖面	长 ₇ 下部	ID-TIMS	美国麻省理工学院	241.06±0.12, 241.558±0.093	Zou等, 2018
16	甘肃崇信汭河	长 ₇ 中下部	ID-TIMS	核工业北京地质研究院	239.0±1.8	本文

间是孢粉植物群发生重要转变的时间节点，本文的研究支持此观点。在笔者系统研究的耀县瑶曲、陇县窑场沟和华亭安口镇等剖面上，均发现孢粉植物群在长₇-长₈界线附近发生了明显变化。长₈及以下层位孢粉化石非常丰富，其特征与中三叠世纸坊组的总体面貌相似；而长₇所获化石甚少，但具环类孢子的多样性在长₇开始明显增加。但这一转变发生的具体时间据孢粉

不能确定，因不能与有海相化石控制的特提斯地区中晚三叠世孢粉组合进行直接对比，但至少说明接近于中晚三叠世之交。孢粉植物群与大化石植物群组成转变时间略有差别的原因或可能是由于长₇湖相泥岩中所含孢粉不能反映周边植物群的面貌。

延长组湖相动物，包括双壳、叶肢介、介形类等的研究结果基本支持铜川组(长₇及以下地层)属于中三

叠世, 而狭义延长组(长₆及以上地层)归晚三叠世的时代意见(苏德英等, 1980; 刘本培和李子舜, 1980; 王思恩和刘淑文, 1980). 除此之外, 长₇油页岩中发现的鱼类化石*Hybodus youngi*亦为中三叠世晚期的特点(刘宪亭, 1962; 中国地质科学院地质研究所, 1980).

延长组顶部的年代比较复杂. 就植物化石而言, 前文已经述及, 延长植物群应该上延到瑞替期, 但缺少中国北方地区晚三叠世晚期的植物组合. 因此, 延长组顶部应未到瑞替期晚期, 但地层缺失量不同地区有差异. 在鄂尔多斯盆地的主体部分可能缺失了瑞替阶或其中上部, 而西部一些地区可能缺失地层要少一些.

6 鄂尔多斯、四川盆地中三叠世重大环境转换及与秦岭造山运动的关系

鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩层的发育特点表明主要火山活动源在南部或西南方向, 主体活动时间为长₈至长₆沉积时期(邱欣卫等, 2009). 地球化学分析显示, 这些火山灰以安山岩-流纹岩质为主, 来自于中酸性喷发岩, 主要源于火山弧钙碱性岩浆源区, 与秦岭造山带的演化关系密切(张文正等, 2009). 长₇下部有一层厚可达2m的凝灰岩, 是延长组中厚度最大, 分布最广, 最为稳定的凝灰岩层; 且长₇中凝灰岩层最多, 密集发育(图2d), 反映了火山的主要活动期, 或代表了鄂尔多斯盆地构造变革及环境变化的主幕.

沉积分析也表明, 上述凝灰岩层集中段之下的长₁₀至长₈沉积时期, 盆地总体上处于河流、三角洲、滨浅湖及沼泽等沉积环境, 地势相对平坦, 水体浅、氧气充足, 动、植物繁育; 而在长₇的沉积初期, 盆地快速沉降, 湖面扩大, 长₈沉积末期起盆地西南和西缘地区处于不稳定的构造环境(邓秀芹等, 2009). 长₈至长₆中震积岩、浊流、滑塌沉积现象普遍发育, 是强烈拗陷动荡的结果, 并与周边的火山和地震活动等有关联(夏青松和田景春, 2007; 傅强等, 2008; 李洁等, 2010; 王峰等, 2010; 陈安清等, 2011). 显然, 多方面研究获得的信息均表明, 始于长₈, 延续至长₇沉积时期末, 是鄂尔多斯盆地的环境重大转折期, 而高峰为长₇沉积时期. 这一环境转换关键时期发生在中三叠世晚期, 大致为拉丁期.

秦岭洋的关闭与秦岭造山运动为延续时间较长的多期次构造事件, 但大量的研究都认为, 在晚三叠世华

北和华南两大板块已经拼合, 而碰撞导致的变质和岩浆作用的年龄数据基本为240~210Ma(张国伟等, 2001, 2004; 刘少峰和张国伟, 2008). 特别是西部的勉略构造带的花岗岩的年龄值多为245~242Ma(金维浚等, 2005), 比如: 合作地区的美武岩体为245~242 Ma(骆必继等, 2012)、谢坑铜金矿区的辉长闪长岩和角闪安山岩为(243.8±1.0)和(242.1±1.2)Ma(郭现轻等, 2011)等. 这些花岗岩的侵入是秦岭主造山期构造活动的岩浆响应, 说明该构造带的高峰活跃期为中三叠世晚期. 赖旭龙等(1995)也从地层学的角度提出拉丁期早期是秦岭地区的重要构造变动期. 总之, 中三叠世拉丁期应是秦岭构造带的重要活动时期.

秦岭南麓的四川盆地及其周缘地区, 三叠系雷口坡组及之下为相对稳定的台地相碳酸盐岩沉积, 之上则以陆相碎屑岩为特点, 雷口坡组沉积后发生了重大的地质构造和环境转变. 研究表明, 四川盆地中、下三叠统碳酸盐岩地层顶部各地高低不一, 为后期剥蚀的结果. 雷口坡组保存的最高层位的时代存在争议(杨遵仪等, 2000). 因上部记录有拉丁期的标准菊石*Progonoceratites*, 雷口坡组上部被归入拉丁阶; 但有学者认为该属有误定的可能, 且与其共生的有其他安尼期的菊石等, 因此将该组归于安尼期为宜(殷鸿福, 1982). 据牙形石雷口坡组应属于安尼期(王志浩和戴进业, 1981). 在四川盆地西北缘, 雷口坡组被天井山组整合覆盖, 后者产丰富的有孔虫和牙形石, 指示时代为中三叠世拉丁期至晚三叠世卡尼期(何炎和岳志兰, 1987; 王志浩和戴进业, 1981; 王成源, 1993), 与之相当的地层在盆地的主体部分全部缺失. 说明沉积间断发生的时间要晚于中三叠世安尼期, 可能为拉丁期早期. 四川盆地东缘的重庆、鄂西地区, 上三叠统须家河组含煤地层平行不整合于中三叠统巴东组滨海相沉积之上, 两者间为重要的环境转换面. 巴东组上部所产植物化石为*Annalepis latiloba*-*Scytophyllum*组合(孟繁松等, 2000), 与鄂尔多斯盆地延长组下部植物组合可以较好的对比(表2), 均以产*Annalepis*和*Pleuromeia*化石为特点. 巴东组中上部发现的有孔虫和菊石指示了拉丁期的时代意见(孟繁松等, 2000). 以上资料说明, 四川盆地的三叠纪主体构造事件起于拉丁期.

综上所述, 无论是四川还是鄂尔多斯盆地, 中三叠纪晚期, 大致为拉丁期, 是一个重要的环境转换时期, 而这一时期又与秦岭主要构造运动的时间基本吻合,

说明三个相邻的构造单元均在拉丁期同步发生了重大变革事件, 三者之间应是相关联的, 是处于同一构造动力背景下的结果。

7 主要结论

新旧古生物资料及新测定的火山凝灰岩高精度同位素测年数据表明, 鄂尔多斯盆地延长组的中下部(长₇及以下地层)之时代应为中三叠世, 大致为拉丁期, 底部或下延至安尼期晚期; 延长组的上部, 即长₆及以上地层的时代属于晚三叠世, 顶部时代最高可达瑞替期早期, 但普遍存在地层缺失; 中-上三叠统的界线位于延长组的内部, 大致与长₇和长₆之间的界线相当; 主力烃源岩长₇油页岩、泥岩的时代为中三叠世拉丁期; 中三叠世拉丁期是鄂尔多斯盆地环境重要转折时期, 这一环境的转折与秦岭的主构造运动期以及四川盆地的重大环境转折期基本等时, 说明这些构造、环境的重大变革可能是相互关联的, 是处于同一大地构造背景之下相同构造动力作用的结果。

致谢 文中植物化石鉴定得到中国地质调查局武汉地质调查中心孟繁松研究员和美国俄勒冈大学Gregory J. Retallack教授的帮助; 锆石同位素测年由核工业北京地质研究院完成; 中国地质大学(北京)于炳松教授、阮壮博士等参加了野外工作; 室内工作得到中国石油勘探开发研究院王华建博士的帮助; 审稿人对文稿进行了认真的审查并提出了很好的修改意见, 在此一并致谢。

参考文献

陈安清, 陈洪德, 侯明才, 楼章华, 徐胜林, 李洁, 苏中堂. 2011. 鄂尔多斯盆地中-晚三叠世事件沉积对印支运动I幕的指示. 地质学报, 85: 1681-1690

程政武. 1980. 古脊椎动物化石. 见: 中国地质科学院地质研究所, 主编. 陕甘宁盆地中生代地层古生物, 下册. 北京: 地质出版社. 115-173

党彝, 赵虹, 李文厚, 陈永胜, 郑小杰, 燕州泉, 贾玉琴. 2007. 鄂尔多斯盆地陕北地区上三叠统延长组不同级次层序界面的识别. 中国地质, 34: 414-421

邓胜徽, 程显胜, 齐雪峰, 罗正江. 2000. 新疆准噶尔盆地晚三叠世-早侏罗世植物组合序列. 见: 第三届全国地层会议论文集编委会, 主编. 第三届全国地层会议论文集. 北京: 地质出版社. 174-178

邓胜徽, 厉大亮. 1998. 宁夏六盘山盆地三叠系新知及其意义. 科学

通报, 43: 425-431

邓秀芹, 李文厚, 刘新社, 庞锦莲, 刘鑫. 2009. 鄂尔多斯盆地中三叠统与上三叠统地层界线讨论. 地质学报, 83: 1089-1096

邓秀芹, 蔺昉晓, 刘显阳, 庞锦莲, 吕剑文, 李士祥, 刘鑫. 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨. 古地理学报, 10: 159-166

付金华, 郭正权, 邓秀芹. 2005. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义. 古地理学报, 7: 34-44

傅强, 吕苗苗, 刘永斗. 2008. 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆浊积岩发育特征及地质意义. 沉积学报, 26: 186-192

傅强, 孙喜天, 刘永斗. 2009. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复及地质意义. 同济大学学报(自然科学版), 37: 1537-1540

傅智雁, 袁效奇. 1998. 宁夏六盘山盆地晚三叠世孢粉组合及其地层意义. 古生物学报, 37: 446-455

郭现轻, 闫臻, 王宗起, 王涛, 吴发富, 付长垒, 侯可军, 李继亮. 2011. 西秦岭谢坑砂卡岩型铜金矿床地质特征与矿区岩浆岩年代学研究. 岩石学报, 27: 3811-3822

韩鹏, 冯胜斌, 李雪梅, 王康乐, 袁效奇, 贺静, 胡爱平. 2014. 鄂尔多斯盆地西缘晚三叠世“古脊梁”隆升地质证据及盆地原型西部边界的确定. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 36: 1-5

何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社. 390

贺静, 冯胜斌, 袁效奇, 韩鹏, 谢古巍, 张才利. 2011. 鄂尔多斯盆地周缘延长组露头剖面砂岩组分及地质意义分析. 岩性油气藏, 23: 30-43

黄枝高, 周惠琴. 1980. 古植物. 见: 中国地质科学院地质研究所, 主编. 陕甘宁盆地中生代地层古生物, 上册. 北京: 地质出版社. 43-114

吉利明, 吴涛, 李林涛. 2006. 陇东三叠系延长组主要油源岩发育时期的古气候特征. 沉积学报, 24: 426-431

江德昕, 王永栋, 魏江. 2006. 陕西铜川晚三叠世孢粉植物群及其环境意义. 古地理学报, 8: 23-33

金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的SHRIMP定年及其构造意义. 岩石学报, 21: 959-966

赖旭龙, 殷鸿福, 杨逢清. 1995. 秦岭三叠纪古海洋再造. 地球科学, 20: 648-656

雷振宇, 张朝军, 杨晓萍. 2000. 鄂尔多斯盆地含油气系统划分及特征. 勘探家, 5: 75-82

李德生. 2004. 重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学. 石油勘探与开发, 31: 1-7

李洁, 陈洪德, 林良彪, 赵俊兴, 陈安清, 朱志军, 彭传利, 张成弓, 陈彦庆. 2010. 鄂尔多斯盆地东南部延长组古地震效应及其地质启迪. 地质评论, 56: 480-489

李亚, 姚建新, 王思恩, 庞其清. 2016. 鄂尔多斯盆地中-晚三叠世陆相地层与建阶. 地球学报, 37: 267-276

李振宏, 冯胜斌, 袁效奇, 渠洪杰. 2014. 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏

- 罗统凝灰岩年代学及意义. 石油与天然气地质, 35: 729–741
- 刘本培, 李子舜. 1980. 瓣鳃类化石. 见: 中国地质科学院地质研究所, 主编. 陕甘宁盆地中生代地层古生物. 北京: 地质出版社. 1–47
- 刘化清, 李相博, 陈启林, 完颜容, 郭彦如, 廖建波. 2013. 鄂尔多斯盆地延长组若干石油地质问题分析. 北京: 科学出版社. 169
- 刘俊, 吴肖春, 李锦玲. 2001. 华北铜川组爬行动物化石的首次发现及其地层意义. 古脊椎动物学报, 39: 67–71
- 刘少峰, 张国伟. 2008. 东秦岭–大别山及邻区盆–山系统演化与动力学. 地质通报, 27: 1943–1960
- 刘宪亨. 1962. 陕北的弓鲛化石二新种. 古脊椎动物与古人类, 6: 150–156
- 刘兆生, 尚玉珂, 黎文本. 1981. 陕西、甘肃一些地区三叠纪和侏罗纪的孢粉组合. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 3: 131–210
- 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇. 2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义. 地学前缘, 19: 199–213
- 孟繁松, 李旭兵. 2002. 长江流域中三叠世肋木植物的衰退及其适应性生存对策. 华南地质与矿产, 2: 60–65
- 孟繁松, 张振来, 牛志军, 陈大友. 2000. 长江流域原始石松植物群及水韭目植物分类与演化. 长沙: 湖南科学技术出版社. 87
- 孟繁松. 1993. 肋木–脊囊植物群在华南的发育及意义. 科学通报, 38: 1686–1688
- 孟繁松. 1998. 长江流域脊囊属化石的研究及现代水韭的起源. 植物学报, 40: 1–7
- 苗淑娟. 1983. 山西洪洞中三迭世孢粉组合. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 6: 161–170
- 潘钟祥. 1934. 陕北油母页岩地质. 地质汇报, 24: 33–46
- 潘钟祥. 1936. 陕北古期中生代植物化石. 中国古生物志, 甲种, 4: 1–49
- 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 毛光周, 王建强. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义. 沉积学报, 27: 1138–1146
- 屈红军, 杨县超, 曹金舟, 范玉海, 关利群. 2011. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深层油气聚集规律. 石油学报, 32: 243–248
- 曲立范, 杨基端, 白云洪, 张振来. 1983. 中国三叠纪孢粉组合特征及其分区的初步探讨. 中国地质科学院院报, 5: 81–94
- 曲立范, 张望平, 余静贤. 1987. 中生代孢粉学三十年来的进展. 见: 中国地质科学院地层古生物论文集编委会, 主编. 地层古生物论文集, 第17辑. 北京: 地质出版社. 29–55
- 曲立范. 1980. 三叠纪孢子花粉. 见: 中国地质科学院地质研究所, 主编. 陕甘宁盆地中生代地层古生物, 上册. 北京: 地质出版社. 115–204
- 曲立范. 1982. 山西交城刘家沟组孢粉组合. 中国地质科学院地质研究所所刊, 4: 83–93
- 陕西省地质矿产局. 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社. 637
- 陕西省地质矿产局. 1998. 陕西省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 281
- 陕西省区域地层表编写组. 1983. 西北区域地层表陕西分册. 北京: 地质出版社. 255
- 史晓, 张炜, 喻建新, 楚道亮, 黄程. 2014. 新疆南、北天山克拉玛依组植物化石. 地质科技情报, 33: 61–66
- 斯行健, 李星学. 1951. 甘肃延长层一种蕨类 *Danaeopsis fecunda* Halle. 科学记录, 4: 85–91
- 斯行健, 周志炎. 1962. 中国中生代陆相地层. 北京: 科学出版社. 180
- 斯行健. 1956a. 陕北中生代延长层植物群. 中国古生物志, 新甲种, 5: 1–217
- 斯行健. 1956b. 甘肃固原延长层的发现. 古生物学报, 4: 285–292
- 何炎, 岳志兰. 1987. 四川江油马鞍山三叠纪有孔虫. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 12: 191–230
- 苏德英, 李友桂, 庞其清, 陈素娥. 1980. 介形虫化石. 见: 中国地质科学院地质研究所, 主编. 陕甘宁盆地中生代地层古生物, 下册. 北京: 地质出版社. 48–83
- 苏德造. 1984. 陕北延长群一新古鳕类及其生物地层意义. 古脊椎动物学报, 22: 261–265
- 苏德造. 1999. 记陕北子长晚三叠世一新的古鳕类. 古脊椎动物学报, 37: 257–266
- 孙艾玲. 1980. 华北地区二迭纪、三迭纪陆生四足类的性质及其时代探讨. 古脊椎动物与古人类, 18: 100–110
- 王成源. 1993. 中国三叠纪牙形刺生物地层. 地层学杂志, 15: 307, 311–312
- 王多云, 辛补社, 杨华, 付金华, 姚泾利, 张瑜. 2014. 鄂尔多斯盆地延长组长7底部凝灰岩锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及地质意义. 中国科学: 地球科学, 44: 2160–2171
- 王峰, 田景春, 范立勇, 陈蓉, 邱军利. 2010. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积充填演化及其对印支构造运动的响应. 天然气地球科学, 21: 882–889
- 王立新, 解志民, 王自强. 1978. 山西沁水盆地早三叠世肋木属的发现及其地层意义. 古生物学报, 17: 195–211
- 王思恩, 刘淑文. 1980. 叶肢介化石. 见: 中国地质科学院地质研究所, 主编. 陕甘宁盆地中生代地层古生物, 下册. 北京: 地质出版社. 84–110
- 王喜富. 1984. 河北中生代植物补充. 见: 地质矿产部天津地质矿产研究所, 主编. 华北地区古生物图册(二), 中生代分册. 北京: 地质出版社. 297–302
- 王喜富. 1977. 川陕地区晚三叠世轮叶状植物一新属. 古生物学报, 16: 185–190
- 王永栋, 江德昕, 谢小平. 2003. 陕西秃尾河晚三叠世孢粉植物群及其环境意义. 沉积学报, 21: 434–440
- 王志浩, 戴进业. 1981. 四川江油、北川地区三叠纪牙形刺. 古生物学报, 20: 138–152
- 王自强, 娄云云. 1990. 陕北中三叠世一种石松植物的大孢子研究. 植物学报, 32: 397–403

- 王自强. 1984. 植物界. 见: 地质矿产部天津地质矿产研究所, 主编. 华北地区古生物图册(二), 中生代分册. 北京: 地质出版社. 224-302
- 武富礼, 李文厚, 李玉宏, 席胜利. 2004. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化. 古地理学报, 6: 307-315
- 夏青松, 田景春. 2007. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组震积岩的发现及地质意义. 沉积学报, 25: 246-252
- 辛补社, 杨华, 付金华, 王多云, 姚涇利, 张瑜, 左博. 2013a. 甘肃靖远宝积山地区上三叠统南营儿群底部凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地层学意义. 地质论评, 59: 267-273
- 辛补社, 杨华, 王多云, 付金华, 姚涇利, 罗安湘, 张瑜. 2013b. 甘肃靖远王家山地区凝灰岩锆石U-Pb年龄及地层对比意义. 地球科学进展, 28: 1043-1048
- 徐仁, 朱家楠, 陈晔, 段淑英, 胡雨帆, 朱为庆. 1979. 中国晚三叠世宝鼎植物群. 北京: 科学出版社. 130
- 杨斌虎, 白海强, 戴亚权, 查理, 李健, 靳文奇, 刘新菊. 2008. 鄂尔多斯盆地庆阳地区晚三叠世延长组长期8沉积期物源与沉积体系研究. 古地理学报, 10: 251-259
- 杨华, 付金华, 袁效奇. 2011. 鄂尔多斯西缘及外围盆地地质剖面图集. 北京: 石油工业出版社. 541
- 杨华, 傅强, 齐亚林, 周新平, 龚宁, 黄少雄. 2016. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组古湖盆生物相带划分及地质意义. 沉积学报, 34: 688-693
- 杨华, 邓秀芹. 2013. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响. 石油勘探与开发, 40: 513-520
- 杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社, 104-105
- 杨友运. 2004. 印支期秦岭造山活动对鄂尔多斯盆地延长组沉积特征的影响. 煤田地质与勘探, 32: 7-9
- 杨钟健. 1961. 山西西北部的一新犬齿类. 古脊椎动物与古人类, 3: 109-113
- 杨遵仪, 张舜新, 杨基端, 周惠琴, 曹洪升. 2000. 中国地层典·三叠系. 北京: 地质出版社. 139
- 叶美娜. 1979. 湖北、四川中三叠统植物化石的发现. 古生物学报, 18: 73-82
- 殷鸿福. 1982. 中国的拉丁阶问题. 地质论评, 28: 236-239
- 雍天寿. 1984. 鄂尔多斯盆地延长群的时代问题探讨. 新疆石油地质, 1: 58-60
- 喻建新, 黄其胜, Broutin J, 杨逢清. 2008. 黔西滇东早三叠世早期 *Annalepis* (脊囊属) 的出现及其地层意义. 古生物学报, 7: 292-300
- 张福礼. 2004. 多旋回与鄂尔多斯盆地石油天然气. 石油实验地质, 26: 138-142, 152
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23: 846-853
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社. 855
- 张辉, 彭平安, 张文正. 2014. 鄂尔多斯盆地延长组长7段凝灰岩锆石U-Pb年龄Hf同素组成特征及其地质意义. 岩石学报, 30: 565-575
- 张文正, 杨华, 彭平安, 杨奕华, 张辉, 石小虎. 2009. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响. 地球化学, 38: 573-582
- 张祖辉, 傅智雁, 罗坤泉, 耿国仓. 1982. 陕甘宁盆地南部中生界孢粉组合. 见: 中国孢粉学会, 主编. 中国孢粉学会第一届学术会议论文选集. 北京: 科学出版社. 116-124
- 赵文智, 王新民, 郭雁如, 刘化清, 白云来. 2006. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世原型盆地恢复及其改造演化. 石油勘探与开发, 33: 6-13
- 郑连弟, 姚建新, 仝亚博, 宋彪, 王立亭, 杨振宇. 2010. 贵州南部地区安尼阶底界锆石SHRIMP年龄结果. 地质学报, 84: 1112-1117
- 中国地质科学院地质研究所. 1980. 陕甘宁盆地中生代地层古生物. 北京: 地质出版社. 212
- 钟小春. 1964. 鄂尔多斯盆地上三迭统及中侏罗统的介形类化石. 古生物学报, 12: 426-447
- 周翔, 何生, 陈召佑, 刘萍, 王芙蓉. 2016. 鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架中烃源岩特征及控制因素. 地球科学, 41: 1055-1066
- Blackburn T J, Olsen P E, Bowring S A, McLean N M, Kent D V, Puffer J, McHone G, Rasbury E T, Et-Touhami M. 2013. Zircon U-Pb geochronology links the end-Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, 340: 941-945
- Brack P, Rieber H, Nicora A, Mundil R. 2005. The Global boundary stratotype section and point (GSSP) of the Ladinian Stage (Middle Triassic) at Bagolino (Southern Alps, Northern Italy) and its implications for the Triassic time scale. *Episodes*, 28: 233-244
- Brack P, Rieber H, Nicora A. 2003. The global stratigraphic section and point (GSSP) for the base of the Ladinian Stage (Middle Triassic). A proposal for the GSSP at the base of the Curionii Zone in the Bagolino section (Southern Alps, Northern Italy). *Albertiana*, 28: 13-25
- Brick M I. 1952. Flora fossil and stratigraphy of lower Mesozoic deposits of the central Ileik River in western Kazakhstan. *Trudy Geologiskhaya Instituta Nauchotekhniskoi Akademia Nauk SSSR*, 9: 3-73
- Deng S H, Lu Y Z, Fan R, Pan Y H, Cheng X S, Fu G B, Wang Q F, Pan H Z, Shen Y B, Wang Y Q, Zhang H C, Jia C K, Duan W Z, Fang L H. 2010. The Jurassic System of Northern Xinjiang, China. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 279
- Dobruskina I A. 1985. Correlation of the Lower Triassic plant-bearing beds of Siberia and China. *Albertiana*, 3: 21-23
- Fliche P. 1910. Flore fossil du Trias en Lorraine et France-Comte. *Bull Soc Sci Nancy*, 11: 222-286

- Grauvogel-Stamm L, Düringer P. 1983. *Annalepis zeilleri* Fliche 1910 emend., un organe reproducteur de Lycophyte de la Lettenkohle de l'Est de la France. Morphologie, spores in situ et paléocologie. *Geol Rundschau*, 72: 23–51
- Grauvogel-Stamm L, Lugardon B. 2001. The Triassic Lycopsids *Pleuromeia* and *Annalepis*: Relationships, evolution, and origin. *Am Fern J*, 91: 115–149
- Harris T M. 1937. The fossil flora of Scoresby Sound, East Greenland. Part 5: Stratigraphic relations of the plant beds. *Medd om Grønland*, 112: 1–114
- Heer O. 1877. Flora fossilis Helvetiae: Die vorweltliche flora der Schweiz. Zurich: J Wurster & Co. 182
- Kelber K P. 1990. Die versunkene Pflanzenwelt aus den Deltasümpfen Mainfrankens vor 230 Millionen Jahren. *Beringeria*, 1: 1–67
- Krasser F. 1900. Die von W. A. Obrutschew in China und Centralasien 1893–1894 gesammelten fossilen Pflanzen. *Debtschr K Akad Wiss Wien Ser Mat-Nat. Klasse*, 70: 1–15
- Kustatscher E, Kelber K P, van Konijnenburg-van Cittert J H A. 2012. *Danaeopsis* Heer ex Schimper 1869 and its European Triassic species. *Rev Palaeobot Palynol*, 183: 32–49
- Lehrmann D J, Ramezani J, Bowring S A, Martin M W, Montgomery P, Enos P, Payne J L, Orchard M J, Hongmei W, Jiayong W. 2006. Timing of recovery from the end-Permian extinction: Geochronologic and biostratigraphic constraints from south China. *Geology*, 34: 1053–1056
- Li J L, Wu X, Zhang F. 2008. The Chinese Fossil Reptiles and Their Kin. 2nd ed. Beijing: Science Press. 473
- Liu J, Abdala F. 2015. New discoveries from the *Sinokannemeyeria-Shansisuchus* Assemblage Zone: 2. A new species of *Nothogomphodon* (Therapsida: Therocephalia) from the Ermaying Formation (Anisian, Middle Triassic) of Shanxi, China. *Vert PalAsiat*, 53: 123–132
- Liu J, Li L, Li X W. 2013. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Triassic Ermaying and Tongchuan formations in Shanxi, China and its stratigraphic implications. *Vert PalAsiat*, 51: 162–168
- Liu J, Ramezani J, Li L, Shang Q H, Xu G H, Wang Y Y, Yang J S. 2017. High-precision temporal calibration of Middle Triassic vertebrate biostratigraphy: U-Pb zircon constraints for the *Sinokannemeyeria* Fauna and *Yonghesuchus*. *Vert PalAsiat*, 55: 1–9
- Liu J, Sullivan C. 2017. New discoveries from the *Sinokannemeyeria-Shansisuchus* Assemblage Zone: 3. Archosauriformes from Linxian, Shanxi, China. *Vert PalAsiat*, 55: 107–125
- Liu J. 2015. New discoveries from the *Sinokannemeyeria-Shansisuchus* Assemblage Zone: 1. Kannemeyeriiformes from Shanxi, China. *Vert PalAsiat*, 53: 16–28
- Mader D. 1990. Palaeoecology of the flora in Buntsandstein and Keuper in the Triassic of Middle Europe. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1–1582
- Moisan P, Voigt S. 2013. Lycopsids from the Madygen Lagerstätte (Middle to Late Triassic, Kyrgyzstan, Central Asia). *Rev Palaeobot Palynol*, 192: 42–64
- Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe I, Renne P R. 2004. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons. *Science*, 305: 1760–1763
- Oliver D. 1873. Hooker's *Icones Plantarum*, vol. 12. London: Longman, Rees, Orme, Brown, Green & Longman. 62–63
- Pálffy J, Parrish R R, David K, Vörös A. 2003. Mid-Triassic integrated U-Pb geochronology and ammonoid biochronology from the Balaton Highland (Hungary). *J Geol Soc*, 160: 271–284
- Pattemore G A, Rigby J F, Playford G. 2015. The Mesozoic megafossil genus *Linguifolium* Arber 1917. *Acta Palaeobotanica*, 55: 123–147
- Retallack G J. 1975. The life and times of a Triassic lycopod. *Alcheringa*, 1: 3–29
- Retallack G J. 1980. Middle triassic megafossil plants and trace fossils from Tank Gully, Canterbury, New Zealand. *J R Soc New Zealand*, 10: 31–63
- Sadovnikov G N. 1982. The morphology, systematics and distribution of the genus *Tomostrobus*. *Palaeont J*, 16: 100–109
- Shen S, Crowley J L, Wang Y, Bowring S A, Erwin D H, Sadler P M, Cao C, Rothman D H, Henderson C M, Ramezani J, Zhang H, Shen Y, Wang X, Wang W, Mu L, Li W, Tang Y, Liu X, Liu L, Zeng Y, Jiang Y, Jin Y. 2011. Calibrating the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 334: 1367–1372
- Swisher C C, Wang Y Q, Wang X L, Xu X, Wang Y. 1999. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 400: 58–61
- Wang Z Q, Wang L X. 1982. A new species of the Lycopsida *Pleuromeia* from the Early Triassic of Shanxi, China, and its ecology. *Palaeontology*, 25: 215–225
- Wu X C, Liu J, Li J L. 2001. The anatomy of the first archosauriform (Diapsida) from the terrestrial Upper Triassic of China. *Vert PalAsiat*, 39: 251–265
- Yu J, Broutin J, Huang Q, Grauvogel-Stamm L. 2010. *Annalepis*, a pioneering lycopsid genus in the recovery of the Triassic land flora in South China. *Comptes Rendus Palevol*, 9: 479–486
- Zou C N, Zhu R K, Cui J W, Deng S H, Luo Z, Lu Y Z, Qiu Z. 2018. High-precision dating and geological significance of Chang 7 tuff zircon of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin in central China. *J Palaeogeogr*, in press

(责任编辑: 沈树忠)