

三叠纪末生物集群绝灭事件*

邓胜徽^{①②} 卢远征^{①②} 徐道一^③

(① 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; ② 中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室, 北京 100083;
③ 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 发生于三叠纪末期的生物集群绝灭事件是显生宙以来 5 大集群绝灭事件之一, 但有关研究远较其余初步, 只是到了近年才成为国际地学界的一个研究热点. 研究表明, 在此次事件中, 海洋生态系统的双壳类、腕足类、菊石、珊瑚、放射虫、介形类、有孔虫等发生了显著的绝灭, 但其他一些门类, 如腹足类、海生脊椎动物等的变化则不明显; 陆生生态系统的植物和四足动物有较明显的影响; 总体上种级的绝灭、更替表现强烈, 而属级以上单元因门类的不同而有别. 对这一集群绝灭事件的成因有多种解释, 从地内和地外方面进行了探讨. 地内说包括由于联合大陆的解体, 大西洋裂开, 玄武岩喷发带出大量的 CO_2 及其他有害气体, 造成温室效应和生态环境的恶化; 以及三叠纪末海退被后续突然海侵造成的大洋缺氧环境. 地外说认为在三叠纪末发生了天体撞击事件, 引发了火山喷发、地震或尘埃蔽日, 造成环境恶化, 致使生物集群绝灭. 由于研究得比较详细的海相剖面有限, 对陆相剖面的研究更为初步, 资料不够详细, 对这一生物集群绝灭事件的基本特征、影响范围和成因、机制等的认识均还存在分歧. 中国西藏有较好的海相三叠系-侏罗系连续剖面, 新疆及华北地区有多处连续发育的陆相三叠系-侏罗系剖面, 加强对这些剖面的研究将会为增加对此事件的认识做出重要贡献.

关键词 三叠纪末 生物集群绝灭事件 成因机制 三叠-侏罗系界线

自Newell^[1,2]的早期研究和Raup和Sepkoski^[3]通过统计提出三叠纪末存在全球性海洋生物集群绝灭事件后, 这一事件逐渐为地学界所熟悉. 在这次事件中, 无论是海洋生态系统还是陆地生态系统都有相当量的生物绝灭^[4~10]. 据Benton^[11]编汇的资料, 在被统计的生存于晚三叠世到早侏罗世的总共 257 个动

物科中, 有 61 个在晚三叠世瑞替期内或其末期绝灭, 而相比之下, 在诺利期只有 32 个科绝灭. 由于瑞替期的时限要短于诺利期, 因此前者的绝灭率要成倍地高于后者^[10]. 在海洋生态系统中有多达 23% 的科和 33% 的属绝灭; 特别是在研究比较详细的欧洲, 发现有 92% 的种和 42% 的属绝灭. 在一些地区, 50%

2005-03-09 收稿, 2005-07-18 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40372021)国际地质对比计划 IGCP(458)项目及中国石油勘探开发研究院特别资助项目

的陆生四足动物种和 95% 的植物种消失^[3,12~16]。这些都说明, 在晚三叠世末发生过一次相当强烈的生物集群绝灭事件, 有的学者甚至认为这是仅次于二叠纪末和白垩纪末的第三大生物集群绝灭事件^[16]。但是, 此事件远不如白垩纪末和二叠纪末的事件那么受到关注, 只是在近年才引起了地学界的注意, 一些学者对此开展了研究, 取得了较大的进展^[14~31]。然而, 目前对三叠纪末生物集群绝灭事件的研究还比较初步, 对其基本特征和性质, 包括发生的时间、过程、规模及影响范围等均还未取得共识, 成因机制还在探索之中。但是, 该事件现已成为国际学术界的研究热点, 国际地科联于 2001 年批准了国际地质对比计划 (IGCP)458 项目 “The Triassic-Jurassic Boundary Events”, 针对这一事件开展国际合作研究。有关研究的基础资料在快速积累中, 理论阐述性成果也在不断问世, 发展相当迅速。

中国三叠纪和侏罗纪地层, 特别是陆相地层十分发育, 有不少连续沉积的剖面, 是研究这一生物绝灭事件的良好地区之一, 只是国内对这领域还比较陌生, 有关研究处于起步阶段, 本文通过介绍这一领域目前的现状及发展前景, 旨在增加国内学者对这一研究领域的了解和兴趣, 促进我国相关研究的开展。

1 三叠纪末生物绝灭事件的特点

与研究比较深入的二叠纪末和白垩纪末生物集群绝灭事件相比, 三叠纪末期生物绝灭的特点比较复杂。现有资料显示, 在三叠纪末的集群绝灭事件中不同的生物门类或同一门类在不同地区的表现不是完全一致的。有些生物门类表现强烈, 显示了大规模的绝灭事件的存在, 其中一些表现为突发性的绝灭, 而另一些则似为逐渐消失; 有些门类则没有明显的集群绝灭现象或情况还不很清楚; 还有的则因地区的不同情况有所差别。

1.1 海相双壳类

海相双壳类是三叠、侏罗系界线附近的古生物中研究最好的门类之一, 以欧洲的资料最为详细。总体表现是在属、种级别上绝灭率高, 而科级水平上并没有太大的改变^[21]。在晚三叠世的 52 个科中只有

Myophoridae 和 Mysidiellidae 绝灭^[11]; 但在属级上消失者则有多达半数。其中对三角蚌类 (Trigonioid), 珠蚌类 (Unionoid) 和马尾蛤类 (Hippuritoid) 的影响最大, 而对 Pholadomoid 的影响较小, 该类生存下来的多^[21]。在欧洲北阿尔卑斯地区, 三叠纪末海相双壳类有 42% 的属和至少 92% 的种绝灭^[8]。Allasinaz^[32]推算出南阿尔卑斯地区有约 88% 的种消失。按 McRoberts 和 Newton^[33] 的估计, 意大利的 Lombardia 剖面上有 71% 的种、奥地利和德国的阿尔卑斯地区有 85% 的种、英格兰和威尔士地区有 90% 的种消失。以上资料反映的情况基本一致, 说明三叠纪末期海相双壳类至少在欧洲发生过大规模的绝灭事件。

有意思的是, 海相双壳类的绝灭还具有一定的选择性。McRoberts 和 Newton^[33] 发现, 潜居型双壳类绝灭率高, 几乎全部消失, 而表栖类型幸存者多, 约有 50% 的种存留。因此, 他们提出此属于选择性的绝灭事件 (selective extinction)。但 Hallam 和 Wignall^[21] 不这么看, 他们认为生存下来的多是那些分布广的类型, 并非表栖类型。另外, 双壳类还显示出 “大者优先” 绝灭的特点。据 Hallam^[10] 的资料, 在这一事件中没有很大壳体的双壳类幸存。晚三叠世的 *Conchodon* 最大量度达到 34 cm, *Megalodon* 17 cm, 而 *Gervillea inflata* 可达 13 cm, 是中生代早期该属的 “巨无霸”。与此相反, Gaetani^[34] 描述的早侏罗世赫唐期的双壳类则都是小壳型。

1.2 腕足类

据 Benton^[11] 的资料, 生存于瑞替期的 19 个腕足类科中有 5 个在瑞替末绝灭, 绝灭率超过了 26%。相比之下, 在诺利期末仅 *Athyrisinidae* 和 *Thecospirellidae* 两个科绝灭。在属一级则表现更为强烈, 如在阿尔卑斯 Carpathian 地区, 晚三叠世的 13 个腕足类属只有 5 个延续到侏罗纪, 绝灭率达 60% 以上, 其中又仅 *Metzeliopsis* 和 *Piarorhynchia* 两个属在侏罗纪还广泛分布, 其余者大为衰弱。在统计的 12 个生存于诺利期-瑞替期的二板贝类 (dielasmaticid) 属中仅 1 个进入了侏罗纪^[21,35], 绝灭率在 90% 以上, 反映集群绝灭事件的存在。与双壳类的 “大者优先” 绝灭的特点类似, 瑞替期的腕足类个体要大, 如 *Qxycolpella oxycolpos* 最

大量度达 4.7 cm, *Rhaetian pyriformis* 达 3.7 cm; 而赫唐期的则很小, 其中最大的 *Lobothyris ovatissimaeformis* 也只有 2 cm^[34].

但是, 并不是所有腕足类的更替都是一致的. 如小嘴贝类(Rhynchonellid)就是一例, 在属一级上并没有实质性的更替^[36]. 表明腕足类中不同分类单元在事件中的反映是不相同的, 需要具体分析.

1.3 菊石

三叠纪的主要菊石类别 *Ceratitina* 在三叠纪末消失了^[37]. 据Benton的资料^[11], 在瑞替期有 17 个科的菊石绝灭, 而诺利期只有 8 个科消失, 由于瑞替期的时期大约只有诺利期的 1/3, 因此, 这反映出前者绝灭率比后者高得多. 但是, 进一步分析发现这些科并不是全部在瑞替末期才绝灭的, 而是逐渐绝灭的^[21]. 然而, 全球至少有 Pinacocerataceae, Arcestaceae, Trachycerataceae, Clydonitaceae, Tropitaceae 和 Choristocerataceae 等 6 个菊石亚科是在三叠纪末绝灭的. 这些亚科中无一个属幸存到侏罗纪^[37]. 在加拿大的 Sevatian 地区, 三叠纪的最后一个菊石 *crickmayi* 带有齿菊石类的 8 个属绝灭^[38], 表明在三叠-侏罗系界线上有相当量的菊石绝灭. 另外, 沟菊石类(Aulacocerida)在晚三叠世末期达到最高分异度, 但在 2 个科的 9 个属中只有 *Atractites* 一个属延入早侏罗世, 同样反映出明显的绝灭事件.

当然, 也不是所有资料都显示出一致的结果, 有的资料反映出晚三叠世存在卡尼期和瑞替期两个菊石绝灭的高峰期^[13], 还有的则表明最大的绝灭事件发生于诺利期而不是瑞替期^[39-41]. 因此, 菊石显示的情况也比较复杂, 还有待于进一步详细研究.

1.4 珊瑚和钙质海绵

在北阿尔卑斯地区造礁珊瑚在三叠纪末大量消失^[10], 甚至出现了早侏罗世赫唐期到早辛涅缪尔期的“礁缺失(reef gap)”期^[42]. 钙质海绵在瑞替期末有 16 个科绝灭, 仅 2 个科存续^[11]. 这种造礁珊瑚和海绵的大量绝灭现象在亚洲和南、北美洲都存在, 反映了全球性的变化^[10]. 此外, 据Beauvais^[43], 在晚三叠世全球分布的 50 个珊瑚属中, 只有 11 个属存留到早侏罗世赫唐期, 绝大部分消失了.

1.5 有孔虫和介形虫

据Benton^[11]的资料, 有孔虫的 38 个科从晚三叠世延续进入了侏罗纪, 晚三叠世只有 3 个科绝灭, 其中两个还是在诺利期末绝灭的^[10]. 因此, 在科一级水平上三叠纪末期有孔虫没有大规模的绝灭现象. 介形类在界线上变化较大, 不但古足目(Palaeocopida)绝灭, 而且女神虫超科(Cytheracea)和土梭子介超科(Bairdacea)也剧烈衰退^[44]. 然而, 在种级水平上, 无论是介形类还是有孔虫均表现出相当高的绝灭率. El Shaarawy^[45]对北阿尔卑斯、英格兰及威尔士地区的研究发现, 三叠纪末约有 21% 的有孔虫种和 23% 的介形虫种绝灭.

1.6 放射虫

在科一级的水平上, 从晚三叠世到早侏罗世放射虫没有明显的衰退现象^[11], 但在属一级却显示了强烈的改变. 据加拿大西部夏洛特皇后岛(Queen Charlotte Island)的资料, 三叠系最顶部放射虫还有 35 个属, 而到下侏罗统赫唐阶则仅剩下单调的几个属了^[46,47], 而且, 西太平洋区的日本^[48]和特提斯区的土耳其^[49]的资料也支持这一变化, 反映出集群绝灭事件的存在.

不过, 有学者对此提出质疑, 如Guex等^[50]认为夏洛特皇后岛的剖面存在地层缺失, 放射虫的集群绝灭是一种假象, 而真实情况并不是那样的.

1.7 海相腹足类

海相腹足类的情况是晚三叠世的 35 个科全部进入侏罗纪, 无一绝灭, 但在诺利期末有包括古生代残存下来的 Murchisoniidae 在内的 7 个科绝灭. 因此, 现有资料表明海相腹足类在三叠纪-侏罗纪之交没有发生过重大演替事件.

1.8 海相脊椎动物

在海生脊椎动物中, 比如鱼类, 并没有明显的集群绝灭迹象. 虽然有人提出海生爬行动物在三叠-侏罗系界线上存在明显的集群绝灭事件^[5]. 但是, 更多的资料并不支持这一结论, 显示海生爬行动物更明显的绝灭应该发生于卡尼期或拉丁期末^[51,52]. 牙形

石的最终绝灭虽然是在三叠纪末期,但是在整个三叠纪中逐渐减少而至最终绝灭的,因此,不能完全算作三叠纪末绝灭事件影响的结果。

1.9 陆生植物群

在一些地区,三叠纪末植物群的绝灭是明显的。比如,在北欧地区,有研究认为有超过 95% 的种级单元在三叠/侏罗系界线上发生了更替^[16]。在东格陵兰的 Jameson Land 剖面上,从晚三叠世的 *Lepidopteris* 带到早侏罗世的 *Thomopteris* 带,中间经过一个 10 m 厚的过渡带,属种组成发生了很大的变化^[53],三叠纪末和侏罗纪植物只有少数几个共同分子^[54],反映绝灭事件的影响。孢粉植物群在一些地区同样出现了显著的更替现象。如在北美东部的 Newark 盆地,三叠系-侏罗系界线上、下孢粉组合有明显的不同,以单囊粉和双囊粉类为主要类型的晚三叠世组合被以 *Corollina* 为主要类型的早侏罗世组合突然取代。中间的过渡层也只有数米厚,只相当于数千年的时间间隔^[17]。在紧贴界线之上,蕨类孢子大量出现,形成一个孢子峰值(Spore spike)^[55,56]。其中典型的三叠纪孢粉 *Patinasporites densus* 及其他孢粉化石的最高出现层位较下侏罗统赫唐阶孢粉 *Corollina* 的首次出现层位仅低 5 m。据 Olsen *et al.* 的研究,每 1 m 厚度大约相当于 1000 年的沉积时间^[17],显示植物群的演替是一个“瞬间”的突变过程。在加拿大北极圈内的 Sverdrup 盆地,许多分子(*Riccisporites*, *Limnosporites*, *Rhaetipollis*) 在晚三叠世末期突然消失,从早侏罗世开始出现 *Cerebropollenites theigartii* ^[57]。

但是,陆地植物群在三叠-侏罗系界线上、下的演替特点比较复杂,不同地区的结果相差比较大。一些资料指示了晚三叠世到早侏罗世植物群保持了较高一致性。例如在欧洲,虽然在北欧植物群更替十分显著^[16],但在更大的范围这种演替则并不明显^[21,58];而且孢粉植物群的变化也是不大^[59-61]。在北美地区,孢粉植物群有明显的变化,但没有发现大化石植物群明显的更替迹象^[62]。在西伯利亚区,孢粉植物群连续发育,但尚未见到突发性变化的特点^[63]。在东格陵兰 Jameson Land 剖面上,虽然大植物群更替十分显著,但孢粉组合的变化却并不明显^[54]。

导致上述复杂结果的原因可能与各地区植物群自身的发育特点有关,也不能排除是由于研究程度的影响。由于陆相地层岩性、岩相变化复杂,在孢粉研究中容易遗漏一些关键的层。在北美 Newark 盆地,这一晚三叠世到早侏罗世孢粉的过渡层仅相当于 5000 年的沉积^[17]。如此“瞬间”形成的沉积在一个岩性变化复杂的地区就容易被错过。在中国新疆准噶尔盆地南缘三叠系与侏罗系的连续剖面上,以往研究中没有发现三叠系与侏罗系之间突然变化的特点^[64],最近,经过更为详细的研究,初步确定在界线附近有一个孢子突然增多、孢粉植物群组成明显变化的层段^[65]。在澳大利亚也发现了 *Corollina* 大量出现并成为优势类型的现象,但其层位似乎在赫唐阶中部^[66],但因为缺少菊石佐证,这一层位归属还有待进一步确认,也不是没有属于赫唐阶底部的可能性。深入而细致的研究是发现这一事件线索的关键。

另一方面,由于不同类型的植物可以产相同或相似形态的孢子或花粉,有时植被的组成变化在孢粉资料中也不一定能清楚地反映出来,如银杏类和苏铁类的花粉都是单沟粉,这两类植物的多寡在孢粉谱图中就很难体现。因此,虽然孢粉分布比大植物为广,资料通常也更为详细,但有时所指示的植物群的构成与实际情况有一定的差距。

1.10 陆生脊椎动物

与海生脊椎动物在三叠-侏罗系界线上下的变化不明显相反,陆生四足动物则发生了大量绝灭和绝灭事件后新生类型的迅速辐射演化事件。据 Benton 编汇的资料^[11],在瑞替期内爬行动物在科一级的水平上有 10 个绝灭,12 个存续到侏罗纪,绝灭者达近半数。瑞替期的绝灭事件不但影响了陆生脊椎动物并且还影响到大陆区的水生类型,导致诸如植龙(*phytosaurus*)、鸟鳄类(*ornithosuchids*)和槽龙类(*thecodontosaurs*)等绝灭^[10]。在北美东部的 Newark 盆地的 Newark 超群中,三叠系与侏罗系界线上下的脊椎动物相差非常大。恐龙脚印在界线之下较小,在界线以上脚印突然增大了许多^[14,17,67],表明恐龙在三叠纪末发生了重要的更替,显示了灾变事件的存在。但是,这一推论受到其他研究结果挑战或质疑^[68-71]。

Benton^[68]和Lucas^[70]都指出, Newark盆地中几乎没有诺利-瑞替期的四足动物骨骼化石, 仅足迹化石不足以说明问题. Lucas还指出, 其他地方也还没有发现从瑞替期到赫唐期连续发育的四足动物群, 因此这一时期四足动物群的演替过程是很难说清楚的.

2 生物集群绝灭事件原因探讨

虽然在三叠纪末集群绝灭事件的特征、性质等尚在争议中, 但对这一事件成因机制的探讨则没有停滞. 生物大规模的绝灭必然与生态环境的急剧破坏相关. 研究者们从海平面变化、大气组成及古气候演变、地外撞击和地内火山爆发等多方面展开探索.

2.1 海平面升降与大洋缺氧事件说

海平面的升降很早就被认为是生物集群绝灭的可能原因^[2]. 这一解释的主要论点是, 由于晚三叠世海平面的下降、大范围的海退, 随即而来的是迅速的海侵、海平面的突然升高, 造成海水缺氧, 致使欧洲海相双壳类绝灭^[8]. 这一观点的主要依据来自研究程度较高的欧洲和北美. 欧洲北部广大地区的资料都显示, 三叠纪末的海退强烈但时间短暂. 在北阿尔卑斯地区, 三叠纪末海退使得礁体发生喀斯特化^[72]; 在南阿尔卑斯地区, 三叠纪与侏罗纪之交海水变浅, 出现过一段时间的碳酸盐台地^[73]. 在早侏罗世最早期由于迅速的海侵, 在赫唐阶最底部灰岩和页岩中, 有机质丰富而底栖生物缺乏的沉积与含个体丰度高但分异度低动物群的沉积交替出现, 表明缺氧事件的存在^[19]. 在北极地区的若干连续剖面上均存在晚三叠世末期海退被早侏罗世快速海侵替代的证据^[21, 57, 74, 75].

但在南半球的智利和秘鲁, 诺利期含大量软体动物和珊瑚的浅海灰岩突然被含菊石的黑色页岩薄层覆盖. 但发生于其时代为瑞替末期, 并一直延续到侏罗纪^[76], 因此海侵并不是到早侏罗世才开始, 而可能在晚三叠世晚期就已经开始, 似说明不同地区这期海侵并不是完全同步的.

以上资料都支持了海平面变化导致大洋缺氧引起生物集群绝灭事件的模式. 然而, 尽管海平面的升降能部分地解释海洋中生物集群绝灭的事件, 但不能很好地解释陆地生物群的绝灭.

2.2 温室效应

由二氧化碳等温室气体引起的温室效应导致大气温度升高, 致使生物发生大规模的绝灭. 而沉积物中的碳同位素值可以反映水体及大气候中 CO_2 的浓度, 也是环境变化的指标. 因此, 近年有不少学者针对三叠-侏罗系界线连续剖面开展了碳同位素研究, 取得了重要的认识.

研究表明, 无论是在海相^[15, 29, 30]还是陆相沉积中^[29], 三叠-侏罗系界线附近有有机碳同位素组成都有明显的变化. 在英国、格陵兰、匈牙利和加拿大等不同地区的三叠纪沉积中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显地高于侏罗纪; 在三叠-侏罗系界线附近 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生显著负向偏移, 最高幅度可达-9‰. 在加拿大西部夏洛特皇后岛的Kennebec Point剖面上, 三叠系与侏罗系界线上有机碳同位素有-2‰的负偏, 在界线附近沉积物中的总有机碳含量出现了大幅度的增加. 而这一负偏出现位置恰好与放射虫集群绝灭的位置相吻合^[15, 77]. 在匈牙利北部的Csövár剖面上, 海相碳酸盐的碳同位素值有-3.5‰的负偏, 而相应的有机碳同位素则有-2‰负偏^[30]. 这一同位素异常现象出现在由菊石、放射虫化石确定的三叠系与侏罗系界线范围之内. 在作为国际三叠-侏罗系界线层型的候选剖面之一的英国St. Audrie's海湾剖面上, 有机碳同位素有达-4‰的负偏值, 这一异常值出现在由菊石 *Psiloceras planorbis* 标定的侏罗系底界上^[78]. 在陆相地层中, 有机碳同位素异常同样存在, 如在东格陵兰Astartekøft剖面上, 有机碳同位素值有-3.5‰的负偏, 其位置也正好出现在Harris^[53]建立的三叠纪 *Lepidopteris* 带和侏罗纪 *Thomopteris* 带之间^[29]. 最近, 在美国内华达New York Canyon剖面也发现瑞替末期有明显的有机碳同位素负偏. 这一负偏出现位置只比早侏罗世菊石 *Psiloceras spelae* 和 *P. tilmanni* 的首现面低 4 m^[79]. 以上表明, 无论是在特提斯海区还是太平洋海区, 无论是海相还是陆相环境, 晚三叠世末的碳同位素负偏现象都是存在的. 这一方面说明在三叠-侏罗系的生物地层界线与碳同位素组成曲线异常相吻合, 是相互印证的, 碳同位素指标可以用于确定三叠-侏罗系界线, 进行大区域间、不同沉积相区之间的对比(图 1);

另一方面,也表明在三叠纪末到侏罗纪早期古环境发生过重大的变化,而且这种环境的变化具有全球一致性。

但是,也并不是所有剖面上所测定的碳同位素结果都是一致的。在奥地利Kendelbach剖面^[80]和加拿大西部的Kunge 岛剖面上^[15],三叠、侏罗系界线上碳同位素则出现了正偏的现象。造成这些现象的真正原因尚不清楚。

虽然世界各地已经研究的三叠系和侏罗系连续剖面还不多,所做的碳同位素研究实例还有限,而且少数剖面的测定的结果还有差异,但展示了有机碳同位素研究的很好前景,值得进一步研究。更多的发现和研究不同地区的连续剖面,则能更全面更系统地查清楚三叠纪与侏罗纪之交地球水体和大气中碳同位素的变化特征,从而更清楚地阐明当时环境的演替过程,并探讨其与生物集群绝灭事件的关系。

大气二氧化碳浓度还可以通过对植物叶气孔密度(SD,即单位面积内的气孔个数)和气孔指数(SI,即单位面积中气孔个数与总细胞数的比值)的调查来估算。比较成功的例子是通过对格陵兰Jameson Land剖面,瑞典Scania剖面上植物化石叶表皮的研究,发现植物气孔器密度和气孔指数从晚三叠世末的瑞替期到早侏罗世初的赫唐期大大降低了^[16]。气孔密度和指数与大气中的CO₂浓度值有关^[81-84],根据这种关系,推断出大气中的CO₂含量从晚三叠世瑞替期的 600 μg/g增加到早侏罗世赫唐期的 2100~2400 μg/g,最高值为原来的 4 倍。大气中的CO₂浓度值成倍高出

正常值,从引起了温室效应^[16,20,23,85],全球的大气温度升高了 3°C~4°C^[86,87]。气候的炎热削弱了光合作用,导致有机碳产生量的严重减少。

三叠纪末气温升高的结论还有植物化石叶形态变化佐证。在格陵兰,从晚三叠世*Lepidopteris*带到早侏罗世*Thomatopteris*带,叶面积大、叶全缘型的属种最先绝灭,少数叶面积小的和叶缘带齿的种则延续到了侏罗纪,而且侏罗纪新出现的分子的叶也是叶面积小、叶缘带齿类型,说明当时气温比较高,叶表面积大、蒸发量大的种不适应气候的变化而消失了^[16]。

然而,不同的观点也同样存在。Tanner等^[22]提出,在三叠纪和侏罗纪之交大气中的CO₂的含量是变化不大。此说还引起了一番争论^[84,85,88]。Fabricius等^[89]则认为,阿尔卑斯地区三叠纪末造礁生物的绝灭是因为水温的剧烈下降所致,并非气温升高造成的。当然,Kendelbach剖面上氧同位素测定的结果并不支持Fabricius等的观点^[74]。

因此,可见三叠纪末到侏罗纪初气候变化的总体趋势及细节意见还不一致,尚待深入研究。

2.3 天体撞击成因说

引起晚三叠世到早侏罗世环境变化的机制有多种解释。其中之一是地外事件说。正如白垩纪末期恐龙的绝灭被解释为与天体撞击有关一样,晚三叠世末生物集群绝灭事件也被与流星撞击的地外事件相关联,被认为是由于地外撞击引起地球生态环境的突然改变,致使生物集群绝灭。证据来自有机和无机界等方面。

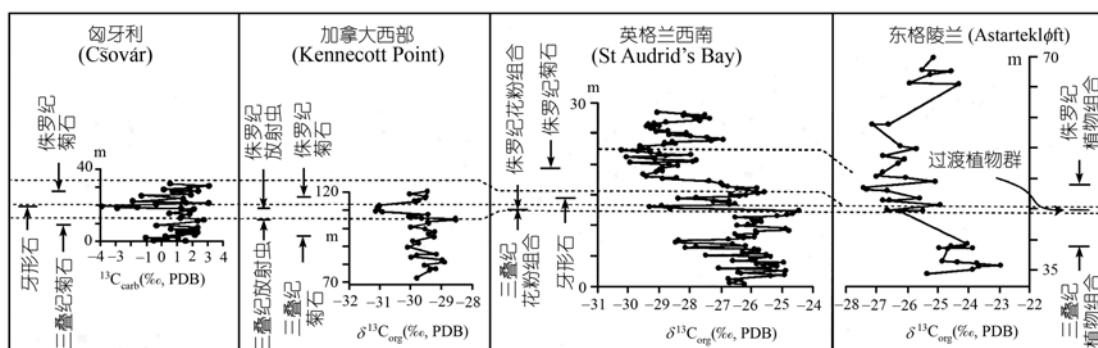


图 1 三叠-侏罗系界线重要剖面的对比(引自文献[29])

在北美Newark盆地, 三叠系与侏罗系界线处有铍异常的存在, 其最高值达0.285 ppb. 这一铍异常与孢子峰值都出现在一白色粘土层中. Olsen等^[17,18]将这一事件与剖面上孢子含量峰值相联系, 认为与白垩-第三系界线的情况^[90]相似, 是撞击灾变事件后蕨类植物首先恢复的结果. Olsen等^[14,17]还将这一撞击事件与加拿大魁北克省的直径达100 km的Manicouagan陨石坑联系起来, 认为该陨石坑指示的撞击事件可能导致了三叠纪末生物集群绝灭. 有关陨击事件的证据还在其他地方发现. 如在意大利Apennines北部三叠系顶部找到3个层位有冲击石英, 表明不但发生过陨击事件, 而且还是多次^[91]. Badjukov等^[92]也声称在Kendellbach Grenzmergel发现了冲击石英, 但此发现也未被有关专家承认, 而且该剖面上也没有发现过铍异常^[21].

前文提到, McRoberts 和 Newton^[34]认为在欧洲双壳类的绝灭是选择性, 潜居生活的绝灭率高, 而表栖类型存活率高. 作者的解释是前者因为得不到食物而绝灭, 其原因可能是撞击事件导致全球性环境的变化, 造成初始生物产能的降低而致食物链的破坏, 影响双壳类食物供给, 结果是潜居类型者因得不到足够的食物而死亡. 但Hallam和Wignall^[21]认为双壳类的资料并不能为撞击事件的存在提供佐证.

英国南部分布的面积达250000 km²的震积层出现于侏罗纪菊石*Psiloceras*首现面之下几米, 也仅比碳同位素负偏位置低0.3 m. 这么大规模震积层的存在可能与某次地外撞击相关^[93]. 但是, 这一认识只是推测, 因缺乏直接而有力的证据, 其与生物集群绝灭事件是否相关同样还缺乏足够的证据.

如上所述, Manicouagan陨击坑被认为很可能与三叠纪末的生物集群绝灭事件相关^[14,17]. Spray等^[94]分析了该陨击坑以及加拿大的另一个陨击坑Saint Martin和法国的Rochechouart、乌克兰的Obolon以及美国的Red Wing等5个撞击构造的形成过程, 认为是在数小时内的连续撞击所致, 就如前些年人们观察到的苏梅克-列维9号彗星连续撞击木星的情景相似, 但是, Kent^[95]根据对上述法国和加拿大陨击坑的熔岩的古地磁极测定所得到的不同结果对这一假说提出了质疑, 认为它们并不是在同一时间相成的. 另外,

就算这些撞击事件是连续发生的, 其发生时间也比三叠纪末的生物集群绝灭事件更早. 因为同位素年龄测定表明, Manicouagan陨击坑的年龄为214 Ma左右, 与三叠纪末生物集群绝灭事件无关, 而可能与晚三叠世多次生物集群绝灭事件中的卡尼期/诺利期绝灭事件关系更密切^[96]. 所以, 即便这一生物集群绝灭事件确是由于地外撞击事件所致, 其真正的肇事者仍然还不能确定.

2.4 火山喷发成因说

另一种代表性的观点则认为是地内因素所致, 特别是火山喷发造成生物集群绝灭^[15,23,25~28]. 这一假说的基本观点是: 在中生代早期, 由于联合大陆的解体, 大西洋开裂, 引发强烈的火山活动, 特别是玄武岩的大量喷发伴随着大量的CO₂气体喷出, 致使大气CO₂浓度升高, 造成温室效应, 致使生物大规模绝灭. 在大西洋两岸的三叠系顶部存在一个面积巨大的玄武岩层^[27]. 其分布范围北起法国, 南到巴西, 即所谓中大西洋火成岩省(Central Atlantic Magmatic Province, 缩写为CAMP), 其展布面积超过7×10⁶ km². 据推算, 这一玄武岩层, 可带来2×10⁶ km³的CO₂^[27], 足以导致温室效应的发生. 这一玄武岩层在北美地区出现于孢粉和放射虫突然变化的界线附近, 时代为早侏罗世最早期, 稍微晚于三叠纪与侏罗纪的界线^[14]. 对玄武岩的放射性同位素年龄测定结果也支持了这一假说. 美国东北部的Fundy盆地的北山玄武岩层的年龄值大约为202±1 Ma, 与三叠/侏罗纪界线年龄接近^[96].

Hesselbo等^[29]也认为, 大规模的火山喷发带出的CO₂和甲烷水合物分解产生的CO₂, 可以造成大气中CO₂含量的增高. 因此, 这一玄武岩层被认为与三叠纪末的集群绝灭事件相关.

Tanner等提出了不同的看法, 认为虽然玄武岩喷发带来的各种气体对环境有很大的影响, 但其中CO₂的量不足以产生明显的温室效应, 而硫化物等有害气体对环境带来影响可能更为重要^[97].

另外, Cohen和Coe^[98]研究了英国南部St. Audrid's海湾剖面三叠/侏罗界线上铍和钼元素的丰度和同位素后, 认为海水中此两种元素的丰度和同位素组成

的突变指示了环境的变迁, 并与大西洋的开裂时的火山活动有关.

3 小结与展望

研究表明, 三叠纪末生物集群绝灭事件在海洋生物双壳类、腕足类、菊石、珊瑚、放射虫、介形类、有孔虫等有明显的表现, 但对海生腹足类和脊椎动物影响则不明显; 在陆生生态系统中, 对植物群和四足动物群有较明显的影响, 不同地区可能有一定差异; 在分类单元级别上, 种级的更替强烈, 属级以上单元因门类的不同而表现有差异.

对这一集群绝灭事件的成因有多种解释, 总结起来主要从地内和地外两个方面探讨. 地内说包括地内因素造成的温室效应和海平面变化等. 温室效应说认为在中生代早期, 由于联合大陆的解体, 大西洋裂开, 玄武岩大量喷发并带出大量的 CO_2 及其他有害气体, 致使大气中 CO_2 浓度升高, 造成温室效应, 气温升高, 造成生物大量绝灭. 海平面变化的观点认为在三叠纪末的短期海退后突然而迅速的海侵带来缺氧的冷海水而致生物的集群绝灭. 地外说以天体撞击为代表, 认为在三叠纪末发生了天体撞击事件, 引发了火山喷发、地震或尘埃蔽日, 造成环境恶化, 气候剧变, 致使生物集群绝灭.

三叠纪末生物集群绝灭事件只是近十年来才受到地学界的关注, 由于已经研究的无论是海相还是陆相剖面都为数有限, 资料尚不全面. 因此, 对这一绝灭事件的基本特征、影响范围和成因、机制等的认识均还存在很大分歧. 但是, 随着世界各地有关研究的深入和国际合作的开展, 相信在不久的将来对以上问题的认识会取得更大的进展.

中国有关研究处在起步阶段, 但是由于中国的西藏有较好的三叠系与侏罗系连续发育的海相剖面^[99], 新疆的准噶尔盆地、塔里木盆地、吐哈盆地、宁夏六盘山盆地及河南济源盆地等都有出露良好陆相三叠系-侏罗系连续剖面^[64], 这些剖面生物化石较多, 暗色泥岩发育, 具有很好的开展这一生物绝灭事件研究的客观条件, 加上以往对这些剖面有较好的工作基础, 通过加强对这些剖面详细而深入的研究, 相信能够在这一领域中做出重要的贡献.

致谢 在英国学习期间与伯明翰大学的 A. Hallam 教授、利兹大学的 P. Wignall 博士和牛津大学的 S. Hesselbo 博士进行过有益的讨论, 并获文献的赠予, 在此谨致谢意.

参 考 文 献

- 1 Newell N D. Crisis in the history of life. *Sci Am*, 1963, 208: 76~92[DOI]
- 2 Newell N D. Revolutions in the history of life. *Geological Society of America Special Paper*, 1967, 89: 63~91
- 3 Raup D M, Sepkoski J J Jr. Mass extinctions in the marine fossil record. *Science*, 1982, 215: 1501~1503
- 4 Raup D M, Sepkoski J J Jr. Periodic Extinction of Families and Genera. *Science*, 1986, 231: 833~836
- 5 Sepkoski J J Jr. Mass extinction in the Phanerozoic oceans: A review. *Geological American Special Paper*, 1982, 190: 283~289
- 6 Sepkoski J J Jr. Global bioevents and the Question of periodicity. In: Walliser O, ed. *Global bioevents: Lecture notes in earth Sciences*, 1986, 8: 47~61
- 7 Sepkoski J J Jr. Pattern of Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. In: Walliser O H, ed. *Global events and event stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin: Springer-Verlag, 1996, 35~51
- 8 Hallam A. The end-Triassic bivalve extinction event. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*, 1981, 35: 1~44 [DOI]
- 9 Hallam A. The end-Triassic mass extinction event. In: Sharpton V L and Ward P D, eds. *Global catastrophes in Earth history: Geological Society of America Special Paper*, 1990, 247: 577~583
- 10 Hallam A. How catastrophic was the end-Triassic mass extinction? *Lethaia*, 2002, 35: 147~157 [DOI]
- 11 Benton M J. *The Fossil Record 2*. London: Chapman and Hall, 1993
- 12 Sepkoski J J Jr. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. III. Post-Paleozoic families and mass extinction. *Paleobiology*, 1984, 10: 246~267
- 13 Benton M J. More than one event in the late Triassic mass extinction. *Nature*, 1986, 321: 857~861 [DOI]
- 14 Olsen P E, Shubin N H, Anders M H. New Early Jurassic Tetrapod Assemblages Constrain Tr-J Tetrapod Extinction Event. *Science*, 1987, 237: 1025~1029
- 15 Ward P D, Haggard J W, Carter E S, et al. Sudden productivity collapse associated with the Triassic-Jurassic boundary mass extinction: *Science*, 2001, 292: 1148~1151 [DOI]
- 16 McElwain J C, Beerling D J, Woodward F I. Fossil Plants and Global Warming at the Triassic-Jurassic Boundary. *Science*, 1999, 285: 1386~1390 [DOI]
- 17 Olsen P E, Kent D V, Sues H D, et al. Ascent of dinosaurs linked to an Iridium anomaly at the Triassic-Jurassic boundary. *Science*, 2002, 296: 1305~1307 [DOI]

- 18 Olsen P E, Koeberl C, Huber H, et al. Continental Triassic-Jurassic boundary in central Pangea: Recent progress and discussion of an Ir anomaly. In: Koeberl C, Macleod K, eds. *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond*. Geol Soc Amer Spec Paper, 2002, 365: 505~522
- 19 Hallam A. Major bio-events in the Triassic and Jurassic. In: Walliser O H, ed. *Global events and event Stratigraphy*. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 265~283
- 20 Hallam A. The end-Triassic extinction in relation to a superplume event. *Geol Soc Am Abs Prog*, 2000, 37: 380
- 21 Hallam A, Wignall P B. *Mass Extinction and their Aftermath*. Oxford: Oxford Univ Press, 1997. 320
- 22 Tanner L H, Hubert J E, Coffey B P, et al. Stability of atmospheric CO₂ levels across the Triassic/Jurassic boundary. *Nature*, 2001, 411, 675~677[DOI]
- 23 Olsen P E. Giant lava flows, mass extinctions, and mantle plumes. *Science*, 1999, 284: 604~605[DOI]
- 24 Walkden G, Parker J, Kelley S. A Late Triassic impact ejecta layer in southwestern Britain. *Science*, 2002, 298: 2185~2188
- 25 Stothers R B. Flood basalts and extinction events. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 1399~1402
- 26 Courtillot V E. Mass extinctions in the last 300 million years: one impact and seven flood basalts? *Israel J Earth Sci*, 1994, 43: 255~266
- 27 Marzoli A, Renne P R, Piccirillo E M, et al. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the central Atlantic Province. *Science*, 1999, 284: 616~618[DOI]
- 28 Yapp C J, Poets H. Carbon isotopes in continental weathering environments and variations in ancient atmospheric CO₂ pressure. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 137: 71~82[DOI]
- 29 Hesselbo S P, Atuart A R, Finn S, et al. Terrestrial and marine extinction at the Triassic-Jurassic boundary synchronized with major carbon-cycle perturbation: A link to initiation of massive volcanism? *Geology*, 2002, 30(3): 251~254
- 30 Palfy J, Attila D, Janos H, et al. Carbon isotope anomaly and other geochemical changes at the Triassic-Jurassic boundary from a marine section in Hungary. *Geology*, 2001, 29(11): 1047~1050[DOI]
- 31 Palfy J, Mortensen J K, Carter E S, et al. Timing the end-triassic mass extinction: first on land, then in the sea? *Geology*, 2000, 28: 39~42[DOI]
- 32 Allasinaz A. The Late Triassic-Hettangian bivalve turnover in Lombardy (Southern Alps). *Revista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 1992, 97: 431~454
- 33 McRoberts C A, Newton C R. Selective extinction among end-Triassic European bivalves. *Geology*, 1995, 23: 102~104[DOI]
- 34 Gaetani M. Faune hettangiane della parte orientale della provincia di Bergamo. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 1970, 76: 355~442
- 35 Pearson D A B. Rhaetian brachiopods of Europe. *Denkschriften der naturhistorisches Museum Wien*, 1977, 1: 1~70
- 36 Manceñido M O. A systematic summary of the stratigraphic distribution of Jurassic Rhynchonellidae (Brachiopoda). *GeoRes Forum*, 2000, 6: 387~396
- 37 Tozer E T. Triassic Ammonoidea: geographic and Stratigraphic distribution. In: House M R, Senior J R, eds. *The Ammonoidea*. London: Academic Press, 1981, 397~431
- 38 Tozer E T. Latest Triassic ammonoid faunas and biochronology, western Canada, Geological Survey of Canada Paper, 1979, 79-1 B: 127~135
- 39 Teichert C. The Permian-Triassic revisited. In: Kauffman E G, Walliser O H, eds. *Extinction Events in Earth History*. Berlin: Springer-Verlag, 1990, 199~238
- 40 Taylor D G, Boelling K, Guex J. The Triassic/Jurassic system boundary in Gabbs Formation, Nevada. *GeoRes Forum*, 2000, 6: 225~236
- 41 Taylor D G, Guex J, Rakus M. Hettangian and Sinemurian ammonoid zonation for the western Cordillera of North America. *Bull Geol Univ Lausanne*, 2001, 350: 381~421
- 42 Stanley Jr G D. The history of Early Mesozoic reef communities: a three-step process. *Palaaios*, 1988, 3: 170~183
- 43 Beauvais L. Evolution and diversification of Jurassic Scleractinia. *Palaeontographica A*, 1984, 54: 219~224
- 44 Whatley R C. Patterns and rates of evolution among Mesozoic Qstracoda. In: Hanai T, Ikeya N, Ishizaki K, eds. *Evolutionary biology of Ostracoda*, Tokyo: Kodansha, 1988, 1021~1040
- 45 El Shaarawy Z. Foraminifera and ostracods of the top most Triassic and basal Jurassic of England Wales and Austria. PhD thesis University of Birmingham, 1981
- 46 Tipper H W, Carter E S, Orchard M J, et al. The Triassic-Jurassic (T-J) boundary in Queen Charlotte Islands, British Columbia defined by ammonites, conodonts and radiolarians. *Geobios*, 1994, 17: 485~492
- 47 Carter E S. Radiolarian extinction and regeneration at the Triassic-Jurassic boundary: an example from Queen Charlotte Islands, British Columbia, Canada. *Publ Ocas Inst Geol, UNAM*, 1997, 1: 5~7
- 48 Hori R. Radiolarian biostratigraphy at the Triassic/Jurassic period boundary in bedded cherts from the Inuyama area, central Japan. *Journal of Geosciences, Osaka City University*, 1992, 35: 53~65
- 49 Tekin U K. Biostratigraphy and systematics of late Middle and late Triassic radiolarians from the Taurus Mountains and Ankara region, Turkey. *Geologisch-Paläontologisch Mitteilungen, Sonderband*, 1999, 5: 1~296
- 50 Guex J, Bartolini A, Taylor D. Discovery of *Neophyllites* (ammonite, Cephalopoda, Early Hettangian) in the New York Canyon sections (Gabbs Valley Range, Nevada) and discussion of the $\delta^{13}\text{C}$ negative anomalies located around the Triassic-Jurassic boundary. *Bull Soc Vaud Sci Nat*, 2002, 88(2): 247~255
- 51 Benton M J. The Late Triassic tetrapod extinction events. In:

- Padian K, ed. *The Beginning of the Age of Dinosaurs*. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1986, 303~320
- 52 Bardet N. Extinction events among Mesozoic marine reptiles. *Hist Biol*, 1994, 7: 313~324
 - 53 Harris T M. The fossil flora of Scoresby Sound East Greenland. Part5: Stratigraphic relations of the plant beds: *Meddelelser om Grønland*, 1937, 112 (2): 1~112
 - 54 Pedersen K R, Lund J J. Palynology of the plant-bearing Rhaetian to Hettangian Kap Stewart Formation, Scoresby Sund, east Greenland. *Review of Palaeobot and Palynol*, 1979, 32: 1~69
 - 55 Fowell S J, Olsen P E. Time calibration of Triassic/Jurassic microfossil turnover, eastern North America. *Tectonophysics*, 1993, 222: 361~369[DOI]
 - 56 Fowell S J, Cornet B, Olsen P E. Geologically rapid Late Triassic extinctions: Palynological evidence from the Newark Supergroup. In: Klein G D(ed). *Pangea: Paleoclimate, tectonics, and sedimentation during accretion, zenith, and breakup of a supercontinent*. Geological Society of America Special Paper, 1994, 288: 197~206
 - 57 Embry A F, Suneby L B. The Triassic-Jurassic boundary in the Sverdrup Basin, Arctic Canada. *Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir*, 1994, 17: 857~868
 - 58 Kelber K P. Phytostratigraphische aspects der makroflora des süddeutschen Keupers. *Doc Nat*, 1998, 117: 89~115
 - 59 Lund J J. Rhaetic to Lower Liassic palynology of the onshore south-eastern North Sea Basin. Copenhagen: Danmarks Geologiske Undersøgels, II Rk, 1977, 109
 - 60 Fisher M J, Dunay R E. Palynology and the Triassic/Jurassic boundary. *Review of Palaeobot and Palynol*, 1981, 34: 129~135[DOI]
 - 61 Karle U. Paltostratigraphische Untersuchung eines Rhät/Lias-Profiles am Fonsjoch, Achensee (Nördliche Kalkalpen, Österreich). *Mitteilungen der österreich geologische Gesellschaft*, 1984, 77: 331~353
 - 62 Ash S. Fossil plants and the Triassic-Jurassic boundary. In: Padian K, ed: *The Beginning of the Age of Dinosaurs*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. 21~29
 - 63 Sarjeant W A S, Volkheimer W, Zhang W. Jurassic palynomorphs of the Circum-Pacific region. In: Westermann G E G, ed. *The Jurassic of the Circum-Pacific*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 373~392
 - 64 邓胜徽, 姚益民, 叶得泉, 等. 中国北方侏罗系, I, 地层总论. 北京: 石油工业出版社, 2003
 - 65 卢远征, 邓胜徽. 准噶尔盆地南缘郝家沟组及八道湾组底部孢粉组合及三叠-侏罗系界线. *地质学报*, 2005, 79(1): 15~27
 - 66 Helby R, Morgan R, Partridge A D. A palynological zonation of the Australian Mesozoic. In: Jell P A, ed. *Studies in Australian palynology*. Memoir of the Association of Australian Palynology, 1987, 4: 1~94
 - 67 Olsen P E, Fowell S J, Cornet B. The Triassic/Jurassic boundary in continental rocks of eastern North America; a progress report. Geological Society of America Special Paper, 1990, 247: 585~594
 - 68 Benton M J. Late Triassic to Middle Jurassic extinctions among continental tetrapods: testing the pattern. In: Fraser N C, Sues H D, eds. *In the shadow of dinosaurs*. 1994, 366~397
 - 69 Weems R E. The "terminal Triassic catastrophic event" in perspective: a review of Carboniferous through Early Jurassic vertebrate extinction patterns. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*, 1992, 94: 1~29[DOI]
 - 70 Lucas S G. Triassic tetrapod extinctions and the complied correlation effect. *Canadian Society of Petroleum Geologists. Memoir*, 1994, 17: 869~875
 - 71 Cuny G. French vertebrate faunas and the Triassic-Jurassic boundary. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*. 1995, 119: 343~358[DOI]
 - 72 Hallam A, Goodfellow W D. Facies and geochemical evidence bearing on the end-Triassic disappearance of the Alpine reef ecosystem. *Historical Biology*, 1990, 4: 131~138
 - 73 McRoberts C A. The Triassic-Jurassic ecostratigraphic transition in the Lombardian Alps, Italy. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*, 1994, 110: 145~166[DOI]
 - 74 Embry A F. Otapirian Stage: Its fauna and microflora: *International Association of Sedimentologists Special Publication*, 1988, 42: 249~260
 - 75 Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes. *Earth Sci Rev*, 1999, 48: 217~250[DOI]
 - 76 Hillebrandt A. The Triassic/Jurassic boundary and Hettangian biostratigraphy in the area of the Utcubamba Valley(north Peru). In: Cariou E, ed. *3 eme Symposium International de Stratigraphie du Jurassique*. *Geobios Memoire Special*, 1994 1: 297~307
 - 77 Ward P, Garrison G H, Haggart J W, et al. Isotopic evidence bearing on Late Triassic extinction events, Queen Charlotte Islands, British Columbia, and implications for the duration and cause of the Triassic/Jurassic mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 589~600[DOI]
 - 78 Warrington G, Cope J C W, Ivimey-Cook H C. St. Audrie's Bay, Somerset, England: A candidate global stratotype section and point for the base of the Jurassic System. *Geological Magazine*, 1994, 131: 191~200
 - 79 Guex J, Bartolini A, Atudorei V, et al. High-resolution ammonite and carbon isotope stratigraphy across the Triassic-Jurassic boundary at New York Canyon (Nevada). *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225: 29~41 [DOI]
 - 80 Morante R, Hallam A. Organic carbon isotopic record across the Triassic-Jurassic boundary in Austria and its bearing on the cause of the mass extinction. *Geology*, 1996, 24(5): 391~394[DOI]
 - 81 Woodward F I. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from preindustrial levels. *Nature*, 1987, 327: 617~618[DOI]
 - 82 Poole I, Weyes J D, Lawson T, et al. Variation in stomatal density and index: implications for palaeoclimatic reconstructions. *Plant Cell Environment*, 1996, 19: 705~712
 - 83 Retallack G J. A 300-million-year record of atmospheric carbon

- dioxide from fossil plant cuticles. *Nature*, 2001, 411: 287~290[DOI]
- 84 Retallack G J. Triassic-Jurassic atmospheric CO₂ spike. *Nature*, 2002, 415: 387~388[DOI]
- 85 Beerling D. Palaeoclimatology (Communication arising): CO₂ and the end-Triassic mass extinction. *Nature*, 2002, 415: 386 ~ 387 [DOI]
- 86 McElwain J C, Chaloner W G. Stomatal density and index of fossil plants track atmospheric carbon dioxide in the Palaeozoic. *Annals of Botany*, 1995, 76: 389~39[DOI]5
- 87 Berner R A. Geochemistry and Geophysics: The Rise of Plants and Their Effect on Weathering and Atmospheric CO₂. *Science*, 1997, 276: 544~546[DOI]
- 88 Tanner L H. Reply (Paleoclimatology: CO₂ and the end-Triassic Mass Extinction). *Nature*, 2002, 415: 388[DOI]
- 89 Fabricius F, Friedrichsen V, Jascobshagen V. Paläotemperaturen und Paläoklima in Obertrias und Lias der Alpen. *Gel Rundsch*, 1970, 59: 805~826
- 90 Tschudy R H, Pilmore C L, Orth C J, et al. Disruption of the terrestrial plant ecosystem at the Cretaceous-Tertiary boundary, western interior. *Science*, 1984, 225: 1030~1032
- 91 Bice D M, Newton C R, McCauley S, et al. Shocked Quartz at the Triassic-Jurassic boundary in Italy. *Science*, 1992, 255: 443~446
- 92 Badjukov D D, Lobitzer H, Nazarov M A. Quartz grains in the Triassic-Jurassic boundary sediments from Northern Limestone Alps, Austria: Lunar and Planetary Science Letters, 1987, 28: 38~39
- 93 Simms M J. Uniquely extensive seismite from the latest Triassic of the United Kingdom: Evidence for bolide impact? *Geology*, 2003, 31(6): 557~560[DOI]
- 94 Spray G J, Kelley S P, Rowley B D. Evidence for a late Triassic multiple impact event on Earth. *Nature*, 1998, 392: 171~173[DOI]
- 95 Kent D V, Olsen P E. Magnetic polarity stratigraphy and paleolatitude of the Triassic-Jurassic Blomidon Formation in the Fundy basin (Canada): implications for Early Mesozoic tropical climate gradients. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 179: 311~324[DOI]
- 96 Hodych J P, Dunning G R. Did the Manicouagan impact trigger end-of-Triassic mass-extinction? *Geology*, 1992, 20: 51~54[DOI]
- 97 Tanner L H, Lucas S G, Chapman M G. Assessing the record and causes of Late Triassic extinctions. *Earth-Science Reviews*, 2004, 65: 103~139[DOI]
- 98 Cohen A S, Coe A L. New geochemical evidence for the onset of volcanism in the Central Atlantic magmatic province and environmental change at the Triassic-Jurassic boundary. *Geology*, 2002, 30: 267~270
- 99 阴家润, 万晓樵, 金朝雯. 东特提斯首条三叠-侏罗系界线剖面. 见:《第三届全国地层会议论文集》编委会编. 第三届全国地层会议论文集. 北京: 地质出版社, 2000. 179~185