华北板块石炭纪-二叠纪地层时间框架

申博恒¹, 沈树忠^{1*}, 吴琮¹, 张水昌², 张斌², 王向东¹, 侯章帅¹, 袁东勋³, 张以春⁴, 刘锋⁴, 刘俊⁵, 张华⁴, 史宇坤¹, 王军⁴, 冯卓⁶

1. 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室和关键地球物质循环前沿科学中心, 南京 210023;
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221116;
4. 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
5. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044;
6. 云南大学古生物研究院, 昆明 650500

* 通讯作者, E-mail: szshen@nju.edu.cn

收稿日期: 2021-09-30; 收修改稿日期: 2022-01-17; 接受日期: 2022-01-21; 网络版发表日期: 2022-04-22

中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDB260000000)、国家自然科学基金项目(批准号: 91955201)和中国石油勘探开发研究院科学研究与技术开发项目(编号: RIPED-2019-JS-984)资助

摘要 华北板块的石炭纪-二叠纪地层蕴含丰富的化石、煤炭和煤层气资源, 是研究晚古生代重大地质事件和化石能源极为重要的地区. 建立华北板块石炭纪-二叠纪地层高精度标准时间框架对阐明重大事件的发生过程和原因以及探明矿产资源的时空分布具有非常重要的科学和现实意义. 在过去近150年的研究中, 华北地区石炭系上部-二叠系底部地层产海相牙形类、蠕类等化石, 对比相对比较清楚. 但二叠纪大部分陆相地层长期以来则主要以孢粉和植物化石带为对比依据, 与海相地层的对比缺乏精确的时代约束. 文章总结了最新的石炭纪-二叠纪地质年代学框架并修订了华北板块的生物地层格架, 认为本溪组属于早巴什基尔期(Bashkirian)至早格舍尔期(Gzhelian), 太原组属于晚格舍尔期至早阿瑟尔期(Asselian), 山西组和下石盒子组属于中、晚阿瑟尔期, 上石盒子组属于萨克马尔期(Sakmarian)至早空谷期(Kungurian), 孙家沟组大部分属于乐平世(Lopingian). 这一新的时代框架大幅改变了华北石炭系-二叠系的传统划分对比方案. 上石盒子组和孙家沟组之间可能存在一个很长的间断(局部长达20个百万年的沉积缺失), 这个间断主要表现为上石盒子组与孙家沟组之间发育的大型冲刷面和一系列古土壤层, 上、下植物群面貌的巨大差异, 可能是古亚洲洋在关闭过程中存在的一次广泛抬升运动的沉积响应. 沉积学分析表明华北板块石炭纪-二叠纪相对海平面升降幅度在0~40m. 植物组合、沉积学证据以及有机碳同位素结果都表明气候温暖湿润的成煤期结束于阿瑟尔期, 较之先前的认识发生更早, 持续时间也更短. 石炭纪至二叠纪期间, 华北板块的构造、古地理和古气候演化受控于泛大陆整体向北漂移和古亚洲洋的关闭.

关键词 华北板块, 石炭纪-二叠纪, 地质年代学, 生物地层, 地层对比

中文引用格式: 申博恒, 沈树忠, 吴琮, 张水昌, 张斌, 王向东, 侯章帅, 袁东勋, 张以春, 刘锋, 刘俊, 张华, 史宇坤, 王军, 冯卓. 2022. 华北板块石炭纪-二叠纪地层时间框架. 中国科学: 地球科学, 52(7): 1181–1212, doi: 10.1360/SSTe-2021-0312

英文引用格式: Shen B H, Shen S Z, Wu Q, Zhang S C, Zhang B, Wang X D, Hou Z S, Yuan D X, Zhang Y C, Liu F, Liu J, Zhang H, Shi Y K, Wang J, Feng Z. 2022. Carboniferous and Permian integrative stratigraphy and timescale of North China Block. Science China Earth Sciences, 65(6): 983–1011, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9909-9>

1 引言

石炭纪-二叠纪是地球生态系统演化的关键阶段, 晚古生代大冰期(Late Paleozoic Ice Age, LPIA)到温室状态的气候转变以及Pangea超大陆的聚合加速了陆地生物(如植物和四足动物)的繁衍与演化, 形成了最复杂的陆地生态系统。而晚古生代大冰期是地质历史时期中唯一可与晚新生代冰期进行对比的时期, 因此具有重要的现实借鉴意义(Gastaldo等, 1996; DiMichele等, 2001, 2008; Rees等, 2002; Roscher和Schneider, 2006; Campi, 2012; Montañez和Poulsen, 2013; Brocklehurst等, 2018; Feng等, 2021)。华北板块自奥陶纪晚期发生抬升以后(张元动等, 2019), 长期缺少沉积, 直到石炭纪中期才再一次接受沉积(王向东等, 2019), 在石炭纪-二叠纪经历了多个重要的演化事件, 其中包括: (1) 古地理位置发生重大变化, 华北板块的位置从石炭纪的古赤道附近逐渐北移进入了二叠纪的北方气候干旱带(Huang等, 2018); (2) 古气候条件发生重大变化, 华北板块从石炭纪和乌拉尔世(Cisuralian, 早二叠世)早期的冰室气候转变为瓜德鲁普世(Guadalupian, 中二叠世)和乐平世(晚二叠世)的温室气候(Zhang等, 1999); (3) 沉积环境发生重大变化, 随着华北板块的逐步抬升, 沉积环境从滨海沼泽成煤环境转入陆地干旱化环境(Liu, 1990); (4) 大地构造背景发生变化, 华北板块以北的古亚洲洋在二叠纪逐步关闭, 对华北板块的地形和沉积记录也产生了重大影响(Xiao等, 2003; Cope等, 2005; Wang等, 2021)。因此, 华北板块的石炭纪-二叠纪地层记录了晚古生代古特提斯洋北部的气候转变和陆地生态系统演化的脉络(Wang, 2010; Liu等, 2015; Liu等, 2020)。石炭纪-二叠纪也是华北板块最主要的成煤期和烃源岩发育期之一(Hilton和Cleal, 2007; Yang和Zou, 2019; Zou等, 2019; Shao等, 2020)。

高分辨率的地层时间框架可以准确地恢复华北板块石炭纪-二叠纪的气候演化和重大地质事件发生的过程, 对沉积矿产资源勘探和预测都至关重要(沈树忠等, 2019)。华北板块的石炭纪-二叠纪地层划分对比具有悠久的历史, 前人分别在生物地层、磁性地层和地质年代学方面开展了大量工作。在生物地层方面, 华北板块石炭系-二叠系主体为陆相地层, 因此, 植物和孢粉化石记录相对完整, 但缺乏足够高的生物地层分辨率和精确时间约束; 而具有较高分辨率的海相化石

(如牙形类、蠕类、菊石类等)记录相对匮乏, 主要局限于石炭纪晚期和二叠纪最早期(范炳恒和何锡麟, 1999; 王成源和康沛泉, 2000; 周建平, 2000; 王志浩和祁玉平, 2003; Wang, 2010; Liu等, 2015; 欧阳舒等, 2017)。在磁性地层方面, 华北板块石炭纪-二叠纪地层可靠的古地磁结果取自极少的采样层位, 而且结果存在质疑, 难于用来对比(Embleton等, 1996; Jin等, 2000; Hounslow和Balabanov, 2018)。在地质年代学方面, 锆石采样层位和测试手段的不同使得不同研究者报道的地层年龄相差甚远(Zhang等, 2007a; 马收先等, 2011; 孙蓓蓓等, 2014; Wang等, 2020; Schmitz等, 2021)。因此, 建立一个统一的地层时间框架仍然困难重重。

近年来, 地质年代学手段的进步使获得可靠的高精度年龄成为可能, 这些高精度年龄彻底改变了传统认识。本文根据最新的地质年代学测年结果(Yang等, 2014, 2020; Wu等, 2021), 对华北板块的生物地层带的时代归属和岩石地层的划分对比进行了整理和总结, 而这一新的时间框架将为解释晚古生代气候、环境演化和矿产资源的形成和分布提供新的思路。

2 华北板块地质背景及石炭系-二叠系划分沿革

华北板块是世界上最古老的块体之一(图1), 其最古老的基底可以追溯到3800Ma(翟明国, 2010), 自新元古代至古生代, 华北板块除了受到中亚造山带(Central Asian Orogenic Belt, CAOB)的影响外整体上处于稳定阶段, 直至中生代华北板块发生克拉通破坏, 一转先前的稳定状态(翟明国, 2010, 2013; 朱日祥等, 2020)。在宾夕法尼亚亚纪-乌拉尔世早期, 华北板块地处低纬度亚热带地区(吴汉宁等, 1990; Huang等, 2018), 气候相对温暖湿润(张泓等, 1999; Falcon-Lang和DiMichele, 2010)。华北板块的石炭系-二叠系是重要的含煤层系, 且在大部分省区均有分布。因此, 除了个别地区外, 华北板块石炭系-二叠系有着统一的岩石地层单元, 自下而上为: 本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和孙家沟组(图2)。以往应用非常广泛的石千峰组(广义)现在已经自下而上分为孙家沟组、刘家沟组和和尚沟组, 其中孙家沟组是二叠系的最高层位。保德扒楼沟剖面因为有着详细的地质年代学和生物地层学研究, 可作为华北板块石炭系-二叠系的典型剖面

图 1 华北板块分布范围示意图

圆点和数字代表本文涉及的剖面及其位置。箭头代表石炭纪晚期海侵方向。华北板块边界据Zhao(2001)。内蒙古古隆起分布范围据Yang等(2006)

(图3)。各岩石地层单元以灰岩层、厚层砂岩层、煤层等标志层为界,可在全区进行追踪和对比(表1)。

华北板块石炭系-二叠系的研究可以追溯到19世纪晚期Richthofen在山西太原西山剖面开展的野外工作(Richthofen, 1882)(图4)。根据地层含煤程度的差异,石炭系-二叠系自下至上被划分为太原系、含煤建造和煤系以上砂岩系(Richthofen, 1882)。此后太原系和含煤建造被合并为富煤的石炭系,煤系以上砂岩系被修订为贫煤的后石炭系。

Richthofen(1882)的地层划分方案具有鲜明的二分性,为之后的地层划分工作所继承和完善。Willis和Blackwelder(1907)认为石炭系应属于上石炭统;Norin(1922, 1924)将石炭系更名为月门沟系并自下而上划分为上石炭统太原系和石炭系-二叠系山西系,对石炭系之上地层则自下而上划分为下二叠统下石盒子系、上二叠统上石盒子系和二叠系-三叠系石千峰系(石千峰系的二叠系部分后来被称为石千峰组,即狭义的石千峰组(盛金章, 1962));Lee和Chao(1926)将太原系划分为中石炭统本溪系和上石炭统太原系,可以视为目前华北板块石炭系-二叠系划分方案的雏形。

华北板块的二叠系-三叠系界线位置取决于石千峰组(狭义,石千峰系的下部,相当于孙家沟组)的归属,即石千峰组应属于上二叠统(Halle, 1927; 李星学和盛金章, 1956; 李星学, 1964; 孔宪祯等, 1996),或跨越二

叠系-三叠系(杨敬之和王水, 1956; 杜宽平, 1958),还是属于下三叠统(王竹泉, 1926; 何锡麟, 1985)。因此,华北板块的二叠系-三叠系界线在狭义的石千峰组或者孙家沟组内变化(王艳鹏等, 2020; Chu等, 2019; Wu等, 2020)。

华北板块的石炭系-二叠系界线早期被置于太原组和山西组界线处(芮琳和张遵信, 1986),这与南方海相石炭系-二叠系界线划在阳新统(栖霞组)之底有关,但较之现在的国际标准高出许多。随着更多化石种属的报道以及中国石炭系-二叠系划分采纳国际划分方案,石炭系-二叠系界线被修订在太原组中部,以牙形类*Streptognathodus isolatus*和蜓类化石*Pseudoschwagerina*的首现为标志,置于L1灰岩(庙沟灰岩)之底(何锡麟, 1985; 孔宪祯等, 1996; 王志浩和祁玉平, 2003)。

在20世纪90年代前,中国的二叠系划分方案以华南为标准,采用二分法。因此,华北板块二叠系的划分方案以华南为参照采用二分法。值得一提的是,华南二分的二叠系与乌拉尔南部二分的二叠系很大不同。华南的二分方案将下二叠统和上二叠统的界线置于乐平统的底界,明显高于乌拉尔南部下二叠统和上二叠统界线卡赞阶(Kazanian)(大致相当于目前国际上采用的罗德阶(Roadian)的上部)的底界。此外,乌拉尔南部的瓜德鲁普统和空谷阶大致相当于华南的下二叠统,阿瑟尔阶至亚丁斯克阶(Artinskian)则被划为上石炭统。

图 2 华北板块石炭系-二叠系剖面

(a) 内蒙古准格尔旗龙王沟剖面本溪组和奥陶系峰峰组平行不整合接触; (b) 山西太原西山七里沟剖面石炭系-二叠系界线; (c) 山西保德桥头剖面山西组底部煤层中的火山灰层; (d) 山西保德扒楼沟剖面二叠系-三叠系界线附近的古土壤层, 含大量钙质结核和同沉积角砾; (e) 山西保德扒楼沟剖面上石盒子组古土壤; (f) 山西保德扒楼沟剖面孙家沟组底部砂岩与上石盒子组顶部紫红色细砂岩和泥岩

图 3 山西保德扒楼沟剖面石炭系-二叠系剖面综合柱状图
据沈树忠等(2020)修改

表 1 华北板块石炭系-二叠系岩石地层单元及其标志层^{a)}

岩石地层	标志层	编号	山西保德	内蒙古准格尔旗	山西太原	山东淄博	河南永城	安徽凤台
孙家沟组	K8砂岩	K8	砂岩	砂岩	K8砂岩	砂岩	平顶山砂岩	厚层砂岩
上石盒子组	—	—	—	—	—	—	—	—
	砂岩	K6	K6砂岩	砂岩	K6砂岩	—	田家窑砂岩	砂岩
下石盒子组	桃花泥岩	Th	桃花泥岩	桃花泥岩	桃花泥岩	—	大紫泥岩	铝土泥岩
	骆驼脖子砂岩	K4	K5砂岩	骆驼脖子砂岩	骆驼脖子砂岩	粗砂岩	砂锅窑砂岩	砂岩
山西组	上煤组	Cs	3#煤	3#煤	3#煤	2煤层	二煤组	10#煤
	北岔沟砂岩	K3	中砂岩	K3砂岩	北岔沟砂岩	S1砂岩	大占砂岩	砂岩
太原组	山坨灰岩	L6	—	—	—	—	L8灰岩	L9-L13灰岩
	东大窑灰岩	L5	—	—	东大窑灰岩	L层灰岩	L5-L7灰岩	
	斜道灰岩	L4	—	—	斜道灰岩	K层灰岩	L2-L4灰岩	L1-L8灰岩
	毛儿沟灰岩	L2~3	保德灰岩	L4灰岩	毛儿沟灰岩			
	庙沟灰岩	L1			庙沟灰岩	G层灰岩	L1灰岩	
	吴家峪灰岩	L0	扒楼沟灰岩	—	吴家峪灰岩	徐家庄灰岩	—	
	晋祠砂岩	K1	K1砂岩	K1砂岩	晋祠砂岩	—	—	砂岩
	本溪组	畔沟灰岩	Lb	张家沟灰岩	L1-L3灰岩	畔沟灰岩	—	—

a) 整理自孔宪祯等(1996)和汪增荫(1997)

所以在全球范围内各个区域的“上二叠统”和“下二叠统”有着不一样的内涵,这也是目前国际上较多地采用乌拉尔统、瓜德鲁普统和乐平统的原因之一。

华北板块三分的二叠系划分方案直至1994年才得以建立。Sheng和Jin(1994)在中国引入国际地层表后修订了年代地层单位。华南的二叠系被划分为3统8阶。因此,华北的二叠系以此为参照进行同样的划分。其中孙家沟组属于长兴阶(Changhsingian),上石盒子组属于冷坞阶至吴家坪阶(Wuchiapingian),下石盒子组属于祥播阶至孤峰阶,山西组属于隆林阶至罗甸阶,太原组作为跨越石炭系和二叠系的岩石地层单位,其二叠系部分属于紫松阶,石炭系部分划归小独山阶,本溪组属于罗苏阶上部至达拉阶。此后,华北板块二叠系的划分按照国际划分方案采用三分标准(金玉玕等, 2000; 全国地层委员会, 2014; 沈树忠等, 2020)。而近年来在高精度地质年代学约束下,华北板块石炭纪-二叠纪地层时间框架发生了很大改变,其中最重要的变化就是过去认为连续沉积的上石盒子组和孙家沟组之间很可能存在很长时间的地质缺失(Lucas和Shen, 2018; 沈树忠等, 2019, 2020; Yang等, 2020; Wu等, 2021; Wang等, 2022)(图4)。

3 地质年代学

目前华北板块石炭系-二叠系中火山灰锆石年龄的报道相对较少,其精度也不一(Zhang等, 2007a; Yang等, 2014; Schmitz等, 2021; Wang等, 2020; Yang等, 2020; Wu等, 2021)。Zhang等(2007a)对北京西山红庙岭组(大致相当于下石盒子组)顶部的火山灰进行SHRIMP锆石U-Pb测年,测得值为(296±4)Ma。Yang等(2014)在华北板块南部永城盆地Zk1401钻芯山西组顶部的火山灰层测得的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(293.0±2.5)Ma。Yang等(2020)报道了从永城盆地Zk0901钻芯火山灰层应用CA-ID-TIMS技术得到的3个更高精度的年龄,分别是太原组顶部的(295.65±0.08)Ma、太原组下部的(299.32±0.12)Ma以及本溪组顶部的(301.13±0.2)Ma。Wu等(2021)报道了从山西保德火山灰层应用CA-ID-TIMS技术测得的6个年龄:太原组顶界年龄为(298.18±0.32)Ma,山西组中段的(295.962±0.086)和(295.346±0.080)Ma两个年龄,上石盒子组下部年龄为(294.8±1.2)Ma,上石盒子组中上部和顶部分别得到两个年龄为(283.93±0.15)和(280.98±0.11)Ma。Wang等(2020)报道了从内蒙古乌海乌达剖

[illegible]

图 4 华北板块石炭系-二叠系划分历史沿革及其对比

地层符号: C₁, 下石炭统; C₂, 中石炭统; C₃, 上石炭统; P₁, 二叠系; P₂, 上二叠统下部; P₂¹, 上二叠统上部; PT₁, 二叠系-三叠系; T₁, 下三叠统;
? , 时代存疑

面太原组顶部火山灰层测得的SIMS锆石U-Pb年龄为 (295.9 ± 1.4) Ma, Schmitz等(2021)在同一层火山灰中报道了 (298.34 ± 0.09) Ma的ID-TIMS锆石U-Pb年龄, 前者年龄偏年轻可能与锆石的铅丢失有关(Wu等, 2017). 这个年龄的不一致说明在对火山灰样品进行SIMS或LA-IPC-MS方法测年时特别需要考虑锆石的铅丢失问题.

由于华北板块石炭纪-二叠纪地层主要为近陆相或陆相碎屑岩系, 碎屑锆石年龄相较于火山灰锆石年龄具有更多的可参考资料(Yang等, 2006; 李洪颜等, 2009; Li等, 2010; 马收先等, 2011; Zhu等, 2014; 刘超等, 2014; 孙蓓蕾等, 2014; 罗顺社等, 2017; Wang等, 2019; Zhu等, 2019; Sun等, 2020)(表2). Yang等(2006)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的北京西山太原组的最年轻碎屑锆石年龄 (304 ± 3) Ma、山西组的最年轻碎屑锆石年龄 (262 ± 2) Ma和双泉组(相当于上石盒子组)的最年轻碎屑锆石年龄 (255 ± 9) Ma. 李洪颜等(2009)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的山西宁武-静乐盆地太原组顶部砂岩最年轻碎屑锆石年龄, 为303~320Ma. Li等(2010)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的陕西延安孙家沟组的最年轻碎屑锆石年龄 (240 ± 3) Ma以及河南济源孙家沟组的最年轻碎屑锆石年龄 (244 ± 3) Ma. 这两个年龄过于年轻, 如果据此年龄, 孙家沟组(石千峰组)时代则将错误地归于中三叠世. 马收先等(2011)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的河北平泉本溪组底部最年轻碎屑锆石年龄 (298 ± 9) Ma. 孙蓓蕾等(2014)报道了山西太原西山基于LA-ICP-MS方法的最年轻碎屑锆石年龄, 太原组底部晋祠砂岩层的295Ma和太原组上部七里沟砂岩层的 (271 ± 7) Ma. Zhu等(2014)报道了山西阳城基于LA-ICP-MS方法得到的最年轻碎屑锆石年龄, 山西组底部砂岩的299Ma和下石盒子组顶部砂岩的291Ma. 刘超等(2014)报道了山西太原西山两个基于LA-ICP-MS方法得到的最年轻碎屑锆石年龄, 分别是上石盒子组下部砂岩的270Ma和孙家沟组底部砂岩的250Ma. 罗顺社等(2017)报道了鄂尔多斯盆地两个基于LA-ICP-MS方法得到的最年轻碎屑锆石年龄, 分别是庆探1井山西组山一段的 (287 ± 3.7) Ma以及庆陇2井的下石盒子组盒8段的 (269 ± 2.2) Ma. Wang等(2019)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的河南宜阳上石盒子组的最年轻碎屑锆石年龄 (294 ± 5.9) Ma以及孙家沟组的最年轻碎屑锆石年龄

(242 ± 3.4) Ma. Zhu等(2019)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的山西保德孙家沟组的最年轻碎屑锆石年龄 (269 ± 3) Ma. Sun等(2020)报道了基于LA-ICP-MS方法得到的甘肃平凉山西组的最年轻碎屑锆石年龄 (281 ± 4) Ma、上石盒子组的最年轻碎屑锆石年龄 (269 ± 4) Ma以及孙家沟组的最年轻碎屑锆石年龄 (389 ± 5) Ma. Wu等(2021)报道了基于CA-ID-TIMS方法得到的山西太原寺沟剖面孙家沟组底部的最年轻碎屑锆石年龄 $\leq (261.75 \pm 0.29)$ Ma(图5). Wang等(2022)报道了内蒙古准格尔旗龙口剖面上石盒子组下部和上部的两个SIMS年龄, 分别是 (287.0 ± 3.0) 和 (276.0 ± 3.8) Ma.

上述火山灰锆石年龄和碎屑锆石年龄为华北板块岩石地层单位的时代归属提供了一定的地质年代学约束. 但是不同学者针对同样的岩石地层单位却报道了差异较大的年龄. 一方面, 这可能受到采样层位不同以及岩石地层单位穿时的影响; 另一方面, 锆石U-Pb测年最广泛使用的LA-ICP-MS测试方法内部误(2%)和外部误差(4%)均较大, 对测试结果的影响不可小觑(李献华等, 2015). 此外, 碎屑锆石经历了一定的磨圆和蜕晶化, 很大可能发生了铅丢失, 在这种情况下采用最年轻的单颗粒锆石或者数据量较小的最年轻峰值年龄结果都不可靠(Coutts等, 2019).

Yang等(2014, 2020)和Wu等(2021)分别对华北板块北部和南部的太原组和山西组顶界进行测年, 得到的年龄依次由老到新, 与华北板块二叠纪海退的方向一致. 因而 (298.18 ± 0.32) Ma可视为华北板块北部太原组的顶界年龄, 该年龄也与Schmitz等(2021)在内蒙古乌海乌达剖面太原组顶部获得的火山灰CA-ID-TIMS锆石U-Pb年龄 (298.34 ± 0.09) Ma吻合; (295.65 ± 0.08) Ma可视为华北板块南部太原组的顶界年龄. 而华北板块北部的山西组顶界年龄为 (295.346 ± 0.080) Ma, 华北板块南部的山西组顶界年龄为 (293.0 ± 2.5) Ma. 山西组上覆的下石盒子组顶界年龄为 (294.8 ± 1.2) Ma. 孙家沟组根据其所含的植物化石和孢粉化石可以判断属于乐平统(Wang和Chen, 2001; Liu等, 2011), 山西太原孙家沟组底界的最年轻锆石年龄 $\leq (261.75 \pm 0.29)$ Ma与乐平统底界年龄 (259.51 ± 0.51) Ma接近(Yang等, 2018), 因而本文暂时采用 (259.51 ± 0.51) Ma作为孙家沟组的底界年龄. 过去认为孙家沟组和下伏的上石盒子组整合接触, Wu等(2021)所测得上石盒子组顶界年龄 (280.98 ± 0.11) Ma的结果显示孙家沟组和上石盒子组可能存在近20

图 5 华北板块石炭纪-二叠纪岩石地层对比

二叠纪年代地层框架据沈树忠等(2019)。牙形类化石带L10和L11之间有L11、L12和L13牙形类化石带。磁极性带灰色条带表示在中国是否存在存疑。界线下的年龄为下伏地层顶界年龄,界线上的年龄为上覆地层底界年龄。正体年龄为火山灰锆石U-Pb年龄,斜体年龄为碎屑锆石最年轻U-Pb年龄。火山灰锆石U-Pb年龄数据来自北京西山(Zhang等, 2007a)、河南永城(Yang等, 2014, 2020)和山西保德(Wu等, 2021);碎屑锆石最年轻U-Pb年龄数据来自山西宁武、静乐(李洪颜等, 2009),陕西延安(Li等, 2010),河北平泉(马收先等, 2011),山西太原(孙蓓蓓等, 2014; 刘超等, 2014),山西沁水(Zhu等, 2014),甘肃庆阳(罗顺社等, 2017)和山西太原(Wu等, 2021)

个百万年的间断。该间断的存在值得去重新审视之前的华北陆相生物地层框架。

本文基于Yang等(2014, 2020)和Wu等(2021)的火山灰锆石年龄建立了华北石炭纪-二叠纪地质年代学地层框架(图5)。此外,同一层组中最接近火山灰锆

石年龄的最年轻碎屑锆石年龄也被选出作为华北板块地质年代学框架的补充。该地质年代学框架不仅为确定华北板块石炭系-二叠纪的时代归属提供了可靠又精确的数据,也有力支持了各类生物带之间的对比。

表 2 华北地区石炭系-二叠系碎屑锆石年龄汇总

区域	采样层位	样品号	岩性	年龄(Ma)	测试方法	参考文献
北京西山	太原组中部	05FW001	砂岩	304±3	LA-ICP-MS	Yang等, 2006
	山西组中部	05FW002	砂岩	262±2	LA-ICP-MS	
	双泉组中部	05FW003	砂岩	255±9	LA-ICP-MS	
山西宁武	太原组顶部	N-8	砂岩	303~320	LA-ICP-MS	李洪颜等, 2009
陕西延安	孙家沟组中部	Y-1	砂岩	240±3	LA-ICP-MS	Li等, 2010
河南济源	孙家沟组中部	J-5	砂岩	244±3	LA-ICP-MS	
河北平泉	本溪组底部	BX9	砂岩	298±9	LA-ICP-MS	马收先等, 2011
山西太原	太原组上部	QLG-A, QLG-B	砂岩	295	LA-ICP-MS	孙蓓蕾等, 2014
	太原组底部	JC-A, JC-B	砂岩	271±7	LA-ICP-MS	
山西阳城	山西组底部	YC-02	砂岩	299	LA-ICP-MS	Zhu等, 2014
	下石盒子组顶部	YC-04	砂岩	291	LA-ICP-MS	
山西太原	上石盒子组下部	SNF	砂岩	270	LA-ICP-MS	刘超等, 2014
	孙家沟组底部	K8	砂岩	250	LA-ICP-MS	
庆探1井	山西组山一段	—	砂岩	287±3.7	LA-ICP-MS	罗顺社等, 2017
庆陇2井	下石盒子组盒8段	—	砂岩	269±2.2	LA-ICP-MS	
河南宜阳	上石盒子组中部	Y-1	砂岩	294±5.9	LA-ICP-MS	Wang等, 2019
	孙家沟组底部	Y-4	砂岩	242±3.4	LA-ICP-MS	
山西保德	孙家沟组	2015BDSJG-1	砂岩	269±3	LA-ICP-MS	Zhu等, 2019
甘肃平凉	山西组	SWOP-01	砂岩	281±4	LA-ICP-MS	Sun等, 2020
	上石盒子组	SWOP-02	砂岩	269±4	LA-ICP-MS	
	孙家沟组	SWOP-03	砂岩	389±5	LA-ICP-MS	
山西太原	孙家沟组底部	SG-18-D-05	凝灰质泥岩	≤261.75±0.29	CA-ID-TIMS	Wu等, 2021
内蒙古准格尔旗	上石盒子组下部	1902	凝灰质泥岩	287.0±3.0	SIMS	Wang等, 2022
	上石盒子组上部	1538	凝灰质泥岩	276.0±3.8	SIMS	

4 生物地层

4.1 牙形类

牙形类化石带是石炭纪-二叠纪地层时间框架中应用最多的生物地层对比工具。目前国际二叠纪地层分会已建立的和计划建立的所有二叠系全球界线层型剖面 and 点位(GSSP)全部使用牙形类标志种的首现作为定义(沈树忠等, 2019)。但是, 华北板块石炭系-二叠系主体为陆相碎屑岩系, 牙形类仅分布在本溪组和太原组的海相灰岩地层中。尽管牙形类产出层位有限, 但可以为相当层位中产出的植物和孢粉等提供生物地层约束。在火山灰年龄的约束和校正下, 本文在华北板块的石炭系-二叠系共整理了8个牙形类化石带: 巴什基尔(Bashkirian)阶2个带, 自下而上为*Idiognathoides*

corrugatus-*I. sinuatus*带(王志浩和张文生, 1985; 丁惠等, 1991)和*Idiognathodus delicatus*-*Neognathodus basleri*带(丁惠等, 1991); 莫斯科(Moscovian)阶1个带, *Idiognathodus magnificus*-*Neognathodus roundyi*-*Streptognathodus parvus*带(万世禄和丁惠, 1987); 卡西莫夫阶-格舍尔阶(Kasimovian-Gzhelian)1个带, *Streptognathodus elegantulus*-*St. oppletus*带(赵松银和万世禄, 1983); 阿瑟尔(Asselian)阶2个带, *Streptognathodus isolatus*带和*Sweetognathus whitei*带(万世禄和丁惠, 1987; 贾映月等, 1994; 高莲凤等, 2005)(图6)。

4.2 蜓类

蜓类是石炭纪-二叠纪重要的化石门类, 其演化迅速, 演化性状易识别, 生物地层序列清晰, 因而被广泛

图 6 华北板块石炭纪-二叠纪生物地层

由于瓜德鲁普统的缺失, 为了能更好地显示乌拉尔统生物带, 将乌拉尔统的生物带按比例放大, 具体放大比例可以参考生物带年龄。正体年龄为火山灰年龄, 斜体为插入的年龄。植物带据张宜(2009)。孢粉组合带据刘锋(2009), Liu等(2015), 欧阳舒等(2017)。四足类据Liu等(2018)。牙形类化石带据万世禄等(1983), 万世禄和丁惠(1984, 1987), 王志浩和李润兰(1984), 王志浩和张文生(1985), 王志浩(1991), 贾映月等(1994), 王志浩和祁玉平(2003), 高莲凤等(2005)。昆虫带据张志存(1983), 张志存和夏国英(1985), 王玉净等(1992)。腕足类据王钰等(1964), 何锡麟等(1990, 1995), 范炳恒等(1997)。

用于特提斯大区的对比(Zhang和Wang, 2018; 沈树忠等, 2019)。蠕类分布在华北板块的本溪组-太原组, 可与华南地区很好地对比。在前人工作基础上, 本文整理了4个蠕类化石组合带: 巴什基尔阶上部至莫斯科阶下部1个带, *Profusulinella parva*带(盛金章, 1958; 盛金章和王仁农, 1982; 王玉净等, 1992); 莫斯科阶上部1个带, *Fusulina-Fusulinella*带(王钰等, 1954; 张遵信等, 1987); 卡西莫夫阶-格舍尔阶1个带, *Montiparus montiparus-Triticites paramontiparus*带(张志存, 1990; 王玉净等, 1992); 阿瑟尔阶1个带, *Pseudoschwagerina-Sphaeroschwagerina*带(梁湘沅, 1994; 蒋汉朝等, 2001; 宋俊俊等, 2014)(图6)。

4.3 腕足类

华北板块石炭纪-二叠纪的腕足类仅仅分布在本溪组和太原组的海相部分, 不足以提供像牙形类和蠕类那样精准的生物地层约束。根据前人研究, 本文整理了华北板块石炭纪-二叠纪的7个腕足动物组合带(图6): 巴什基尔阶1个组合带, *Linoproductus liaoningensis-Choristites crassicostatus*组合带(王钰等, 1964; Shen等, 2017); 莫斯科阶1个组合带, *Brachythyridina lata-Choristites yanghukouensis-Echinoconchus elegans*组合带(韩同相, 1987; 何锡麟等, 1990, 1995; 范炳恒等, 1997; Shen等, 2017); 卡西莫夫阶-格舍尔阶1个组合带, *Neochonetes sarcinulatus-Chonetinella lata*组合带(韩同相, 1987; 何锡麟等, 1990, 1995; 范炳恒等, 1997); 阿瑟尔阶4个组合带, 自下而上为*Derbyia shanxiensis-Brachythyridina strangwaysi-Chonetinella flemingi*组合带、*Beecheria minima-Enteleles hemiplicata*组合带、*Alexenia gratiodentakis-Notothyris nucleolus-Paraspirifer sin-kiangensis*组合带和*Martinia semiplana-Purdonella pseudonikitini-Choristites jigulensis*组合带(韩同相, 1987; 何锡麟等, 1990, 1995; 范炳恒等, 1997)。

4.4 植物

华北地区石炭纪-二叠纪的植物研究始于19世纪中后期, 经过一百多年历程, 对华北地区石炭纪-二叠纪的植物区系、化石组合面貌以及区划对比都有了全面深入的认识(李星学, 1964, 1995; 耿国仓, 1985a; 杨关秀, 1985, 2006; Wang, 2010)。由于华夏植物群具有强烈的分区性, 建立华北板块统一的石炭纪-二叠纪植

物带仍然困难。张宜(2009)在山西保德建立的植物带由于有良好的地质年代学约束(Wu等, 2021), 具有良好的对比意义。因此, 本文选择张宜(2009)的方案将华北板块的石炭系-二叠系划分为7个植物化石组合带(图6): 莫斯科阶-格舍尔阶下部1个组合带, *Lepidodendron-Linopteris aff. simplex*组合带; 格舍尔阶上部-阿瑟尔阶3个组合带, 自下而上为*Annularia stellata-Lepidodendron aff. liuheense*组合带、*Emplectopteris triangularis-Lobatannularia sinensis*组合带和*Cathaysiopteris whitei-Tingia carbonica*组合带; 萨克马尔阶-空谷阶下部2个组合带, *Taeniopteris norinii-Sphenopteridium pseudogermanicum*组合带和*Gigantonoclea-Lobatannularia lingulata*组合带; 乐平统1个组合带, *Callipteris-Taeniopteris*组合带。

值得一提的是, Xiong等(2021)对华北板块乌拉尔世至中三叠世的植物化石记录进行了详细的多维度统计分析, 发现太原组、山西组、下石盒子组和上石盒子组之间的植物组合面貌具有稳定的继承性; 而上石盒子组与孙家沟组之间的植物组合面貌发生急剧变化, 只有极少数的种从上石盒子组延续到孙家沟组, 种级灭绝率达到94%。上石盒子组与孙家沟组植物组合面貌的显著差异, 表明这两个组的植物组合面貌在演化上存在不连续性。而造成这种不连续性的原因, 很有可能就是这两个组之间存在较长的沉积间断。

4.5 孢粉类

前人对华北板块石炭纪-二叠纪的孢粉组合进行了详细的研究, 明确了华北板块各地的孢粉组合面貌(耿国仓, 1985b; 煤炭科学研究院地质勘探分院, 1987; 张子福和赵立萍, 1990; 欧阳舒和侯静鹏, 1999; 侯静鹏和欧阳舒, 2000; 朱怀诚, 2001; 朱怀诚等, 2002; 王明镇等, 2004; 刘锋, 2009; Liu等, 2015; 欧阳舒等, 2017)。但目前建立华北板块全区的石炭纪-二叠纪孢粉组合仍存在困难, 这是因为相当多的孢粉化石采自钻井, 确切的层位信息不得而知。此外, 没有海相化石层的约束, 孢粉的时代归属存在很大不确定性。

由于山西保德扒楼沟剖面的孢粉化石采自连续的剖面, 层位关系非常明确。同时扒楼沟剖面有着很好的地质年代学约束(Wu等, 2021)。因此, 本文选择在山西保德扒楼沟剖面建立的9个孢粉组合带来代表华北的石炭纪-二叠纪孢粉面貌(刘锋, 2009; Liu等, 2015)(图

6): 莫斯科阶1个带, *Torispora securis-Torispora laevigata*(SL)孢粉组合带; 卡西莫夫阶至格舍尔阶2个带, *Reticulatisporites polygonalis-Endosporites globiformis*(PG)孢粉组合带 *Torispora verrucosa-Pachetisporites kaipingensis*(VK)孢粉组合带; 阿瑟尔阶2个带, *Thymospora thiessenii-Striatosporites heylerii*(TH)孢粉组合带和 *Radiizonates solaris-Platysaccus minus*(SM)孢粉组合带; 萨克马尔阶-空谷阶下部3个带, 自下而上为 *Indospora cingulata-Sinulatisporites shansiensis*(CS)孢粉组合带、*Playfordiaspora crenulata-Schopfites convolutus*(CC)孢粉组合带和 *Patellisporites meishanensis-Brialatisporites iucundus*(MI)孢粉组合带; 吴家坪阶1个带, *Patellisporites baodeensis-Spinozonotriletes baodeensis*(BB)孢粉组合带. 由于山西保德未发现长时期的孢粉组合, 为了保证孢粉组合的完整性, 本文以 *Lueckisporites virkkiae-Jugasporites schaubergeroides*(VS)孢粉组合带来代表长时期的孢粉面貌(侯静鹏和欧阳舒, 2000; 朱怀诚等, 2002; 欧阳舒等, 2017).

4.6 四足动物

杨钟健和叶祥奎(1963)报道了山西保德发现的锯齿龙类, 并命名为二叠石千峰龙(*Shihtienfenia permica*). 这一发现揭开了华北地区石炭纪-二叠纪四足动物研究的序幕(卢立伍和陈晓云, 2010). 在近六十年的研究历程中, 始椎类、迟滞鳄类、锯齿龙类、大鼻龙类、二齿兽类、兽头类和犬齿兽类等四足动物化石相继在山西保德(杨钟健和叶祥奎, 1963; 王军等有, 2019)、山西柳林(程政武, 1980; 高克勤, 1983; Li和Liu, 2013)、山西寿阳及阳泉(Chen和Liu, 2020; Liu, 2020; Yi和Liu, 2020)、河南济源(杨钟健, 1979; Liu等, 2014a)、内蒙古包头(朱扬琮, 1989; 李锦玲和程政武, 1997; Liu和Abdala, 2017; Liu, 2021)等地被发现.

尽管四足动物的化石记录没有其他门类那么连续, 但由于瓜德鲁普统-乐平统在Pangea大陆广泛分布, 对全球的瓜德鲁普统和乐平统对比以及二叠纪末陆地生物大灭绝层位的识别意义重大(刘俊, 2018; Liu等, 2020; Smith, 2020). 目前在华北板块建立了河南龙(*Honania*)组合带和石千峰龙(*Shihtienfenia*)组合带2个相当完整的四足动物组合. 本文采用这两个四足动物组合作为华北板块二叠系乐平统四足动物的代表(图6).

5 化学地层

为了能得到华北板块石炭系-二叠系完整的碳同位素剖面, 基于煤和富有机质细粒沉积岩得到的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 较之基于海相碳酸盐岩得到的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 是更实用的指标. 石炭纪-二叠纪(阿瑟尔期-早空谷期)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 剖面由华北板块的色尔腾山、西山和淮南等煤田的煤系结果复合而成(Zhang等, 1999)(图7). $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 曲线以巴什基尔期的高值-22‰作为开始, 在卡西莫夫期-中格舍尔期有一个3.8‰的碳同位素负漂. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值从中格舍尔期上升, 在早阿瑟尔期达到了-22.2‰. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的上升可能指示有机碳埋藏增加, 从而降低大气 CO_2 浓度, 气候变冷. 如果这个变化代表了全球变化, 这可能反映了自石炭纪以来晚古生代大冰期的延续(Bugisch等, 2011; Chen等, 2016).

中阿瑟尔期碳同位素曲线有一个约1~1.5‰的碳同位素负漂, 之后稳定在~-23.2‰, 在中阿瑟尔期微降到~-23.6‰, 随后在晚阿瑟尔期发生第二次显著的3.3‰的碳同位素负漂. 类似的碳同位素曲线趋势在沁水盆地和华北-渤海湾盆地都有所记录(Xu等, 2020). 但是华北-渤海湾盆地南部和东部乌拉尔世煤系显示了更显著的碳同位素负漂, 其平均值可以达到-25.2‰. 有研究认为这是区域干旱化的结果(Xu等, 2020).

在晚阿瑟尔期, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在-26~-22.2‰范围内变化, 平均值为-24.1‰. 萨克马尔期有一个2‰的碳同位素负漂, 随后在萨克马尔期-亚丁斯克期之交 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值小幅上升. 早空谷期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在-24.8~-26‰范围内小幅波动. 这个 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 低值很可能是 P_2 冰期大范围有机碳埋藏的响应(Montañez等, 2007), 在高纬度区和古赤道区均有所记录(Birgenheier等, 2010; Forte等, 2018; Liu等, 2018).

华北板块石炭纪-二叠纪(阿瑟尔期-早空谷期)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 曲线与全球碳同位素曲线较为相似(Peters-Kottig等, 2006; Montañez等, 2007; Nordt等, 2016)(图7). 但是由于中空谷期至卡匹敦期之间的沉积间断, 该时期的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 曲线仍有待研究. 此外, 乐平统煤的匮乏使得建立与乌拉尔世相似的乐平世碳同位素曲线较为困难. 二叠系-三叠系界线处的 *Clarkina meishanensis* 牙形类化石带附近可以识别出一个全球性的无机和有机碳同位素负漂, 该负漂达3~5‰, 可作为全球二叠系-三叠

图 7 华北板块石炭纪-二叠纪环境变化

全球(橙色虚线 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 数据据Nordt等(2016), 华北板块(蓝色粗实线)和短期(蓝色细实线)海平面变化据Hao和Schutter(2008), 2.5 Ma 趋势(红色粗虚线)和3.0 Ma 趋势(红色细虚线)据Liu等(1998), 二叠系-三叠系界线处的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 数据据Wu等(2020)和Lu等(2020), 全球长期(蓝色粗实线)和短期(蓝色细实线)海平面变化据Hao和Schutter(2008), 2.5 Ma 趋势(红色粗虚线)和3.0 Ma 趋势(红色细虚线)据Liu等(1998), 为了便于展示, 华北板块二叠纪的海平面变化曲线进行适当放大, 见图中年龄标注处, 古赤道区植物群地理规模据Clea和Thomas(2005), 东澳大利亚的冰期据Garbelli等(2019), 古赤道区植物群的时空分布据Hilton和Clea(2007), 北美和欧洲的古气候变化据Tabor和Poulsen(2008), 华北的古气候变化据张泓等(1999), 植物演化事件据王自强和王立新(1986), Wang(2010)和Stevens等(2011), 全球大气圈 pCO_2 据Richey等(2020), 全球古地理据Scotese(2016), 1 ppmv= $\mu\text{L L}^{-1}$

系界线附近对比可靠的地球化学标志(Zhang等, 2016; 沈树忠等, 2019). 目前二叠系-三叠系界线在华北地区的具体层位还未有定论. Wu等(2020)报道了华北板块石川河、紫石崖和大雨淋等剖面二叠系-三叠系界线1.7~2.2‰的碳同位素负漂移, 将二叠系-三叠系界线置于孙家沟组中部. Lu等(2020)在华北板块禹州煤田相似层位也识别出了2.7‰的碳同位素负漂移, 将二叠系-三叠系界线置于孙家沟组顶部附近. Zhu等(2019)在山西保德剖面和东寨剖面孙家沟组顶部也报道了显著的无机碳同位素负漂. 相似的碳同位素负漂移在中国新疆准噶尔盆地锅底坑组(Cao等, 2008)和西南地区卡以头组(Zhang等, 2016)以及巴基斯坦盐岭Chhidru组最顶部(Schneebeil-Hermann等, 2013)均有报道.

6 地层对比

华北板块石炭系的海相生物地层记录相对较为完整. 自Yang等(2020)首次报道高精度年龄以后, 在高精度年龄的约束下有望实现石炭系的精细对比. 华北板块二叠系具有高分辨率的海相生物地层记录较为有限, 而连续的陆相生物地层记录分辨率则较低. 加之可靠的地质年代学年龄相对匮乏, 目前对比仍存在困难. 山西保德的二叠系报道了连续的高精度火山灰年龄(Wu等, 2021), 可以为生物地层提供地质年代学约束. 因此, 本文根据山西保德的生物带和高精度U-Pb年龄(图8), 将该地区与邻区的生物带进行对比, 提供基本的岩石地层单元对比框架(图9).

华北地区最老的牙形类*Idiognathoides corrugatus-Idiognathodus sinuatus*带属于巴什基尔阶下部, 分布在华北板块东部东北缘和东南缘(丁惠等, 1991), 揭示华北板块的海侵可以追溯到早巴什基尔期, 且最先影响华北板块东部(图9). 山西保德的本溪组建立了牙形类*Idiognathodus delicatus-I. magnificus*带和螳类*Pseudotaffella sphaeroidea cuboides-Hemifusulina vzhgalica*带(孔宪祯等, 1996), 同华北板块大多数地区的本溪组牙形类带和螳类带层位一致, 属于莫斯科阶. 因此, 莫斯科期海水已经基本覆盖整个华北板块.

山西保德的太原组下段建立了牙形类*Neognathodus bassleri-Streptognathodus elegantulus*带和螳类*Tritictes sinuosus-Montiparus minutus*带, 上段建立了牙形类*Streptognathodus elegantus-St. elongatus*带和螳类*Ea-*

*parafusulina pusilla-E. pailensis ferganensis*带(孔宪祯等, 1996). *Neognathodus bassleri-Streptognathodus elegantulus*带和*Tritictes sinuosus-Montiparus minutus*带产出层位一致, 且同华北板块大多数地区的太原组下段牙形类带和螳类带层位一致, 属于卡西莫夫阶-格舍尔阶(图9). 值得注意的是, *Neognathodus bassleri-Streptognathodus elegantulus*带在华北板块南部普遍缺失, 可能反映卡西莫夫期-格舍尔期华北地区南部海水深度较浅, 牙形类化石不易保存(贾映月等, 1994).

牙形类*Streptognathodus elegantus-St. elongatus*带和螳类*Eaparafusulina pusilla-E. pailensis ferganensis*带均在山西保德太原组上部L1灰岩(保德灰岩)发现(孔宪祯等, 1996). 前者含有石炭系-二叠系界线的标志性分子*St. isolatus*, 后者则有膨胀型的螳类*Pseudoschwagerina*、*Sphaeroschwagerina*和*Pseudofusulina*属分子. Wu等(2021)报道了L1灰岩之下的(298.925±0.073)Ma和之上的(298.18±0.32)Ma两个年龄. 在年龄、牙形类和螳类标志性分子的约束下, 可认为保德的太原组上段属于阿瑟尔阶下部, L1灰岩底部即为石炭系-二叠系界线. 华北板块大部分地区的太原组上段L1灰岩均产出可与保德L1灰岩对比的牙形类和螳类化石. 因此, 可以认为华北板块的石炭系-二叠系界线即为L1灰岩底部. 但在河南焦作硫磺矿剖面, *St. isolatus*的首现层位为L6灰岩(林又玲和毛桂英, 1990), *Pseudoschwagerina-Sphaeroschwagerina*带分子的首现层位为L1灰岩(宋俊俊等, 2014). 因此, *St. isolatus*在这一地区的出现层位显然较晚, 下部层位中的牙形类需要更进一步的研究.

华北板块北部和中部的太原组顶界均在牙形类*Streptognathodus elegantus-St. elongatus*带和螳类*Eaparafusulina pusilla-E. pailensis ferganensis*带顶界附近. 但化石记录表明华北板块北部山西保德的这两个带顶界相对华北板块中部山西太原、陵川等地的同类带的顶界较低(孔宪祯等, 1996). 而华北板块南部的太原组顶界则在华北板块层位最高的牙形类带*Sweetognathus whitei*带顶界附近(贾映月等, 1994; 高莲凤等, 2005).

*Sweetognathus whitei*一种建立于美国, 在美国与*Streptognathodus florensis*共生(Rhodes, 1963). *Streptognathodus*属的消退已识别出发生在阿瑟尔阶和萨克马尔阶界线处(Henderson, 2018). 因此, 美国的*Sw. whitei*时代应属于晚阿瑟尔期至萨克马尔期最早期. 但是俄

图 8 基于山西保德扒楼沟剖面的华北板块地质年代和生物地层框架

植物据张宜(2009). 孢粉组合带据刘锋(2009), Liu等(2015), 欧阳舒等(2017). 牙形类和昆虫类据孔宪祯等(1996)

图 9 华北板块石炭系-二叠系划分与对比

剖面位置见图1. 黑色线表示岩石地层单元推测的界线, 红色线表示岩石地层有地质年代学年龄约束的界线. 绿色区域代表下石盒子组, 相当于包头的下石叶湾组、北京的红庙岭组 and 开平的唐山组. 年龄数据据Yang等(2014, 2020)和Wu等(2021)

罗斯乌拉尔地区的*Sw. "whitei"*的首现位置被用来定义亚丁斯克阶底界(Chernykh等, 2020)。俄罗斯的*Sw. "whitei"*明显不同于美国的“同名种”。而且由于其未与*Streptognathodus*属共生, 同时乌拉尔地区亚丁斯克阶-萨克马尔阶界线附近已有3个年龄报道, 分别是界线之上4m处的(290.81±0.09)Ma、之上10.5~13m的(288.36±0.10)和(288.21±0.06)Ma(Schmitz和Davydov, 2012)。这些证据表明俄罗斯的*Sw. "whitei"*比起美国的“同名种”时代更新。因此, 乌拉尔南部的*Sw. "whitei"*要是继续用于定义亚丁斯克阶底界的话, 仍然需要深入的分类学研究。乌拉尔南部的*Sw. "whitei"*被认为是与广西来宾栖霞组主灰岩段下部报道的*Sw. asymmetricus*同物异名(Sun等, 2017), 但是主灰岩段发现的蜚类*Miselina claudiae*揭示其时代属于早空谷期。华北定义的*Sw. whitei*一种与*Streptognathodus*一属共生, 因此, 它很可能是北美*Sweetognathus whitei*的同物异名。而该对比也得到了临近区域太原组顶部的年龄报道的支持(Yang等, 2020)。

生物地层结果指示华北板块太原组岩石地层顶界时代自北向南依次变新, 这一趋势与华北板块乌拉尔世海退方向自北向南一致(邵龙义等, 2014)。目前的CA-ID-TIMS U-Pb高精度年龄指示华北板块北部的太原组顶界时代属于早阿瑟尔期(Wu等, 2021), 华北板块南部则属于晚阿瑟尔期(Yang等, 2020)。因此, 华北板块中部的太原组顶界时代应属于中阿瑟尔期(孔宪桢等, 1996)(图9)。

由于华北板块二叠纪岩石地层单元整体表现出较强的穿时性, 其顶界自北向南时代逐渐变新(汪增荫, 1997)。而自山西组开始华北板块逐渐过渡为陆相沉积, 只有植物化石和孢粉化石能够提供相对完整的生物带序列。但植物化石和孢粉化石与海相化石的对比仍存在问题。植物化石和孢粉受限于较少的产出以及采样层的不确定, 不足以提供和海相化石一样高的分辨率(沈树忠等, 2019)。因此, 山西组到孙家沟组的对比需要高精度年龄的约束。目前已有山西组顶界、下石盒子组顶界、上石盒子组顶界以及孙家沟组底界等界线的年龄(Yang等, 2014; Wu等, 2021)。这些年龄揭示: (1) 华北板块北部的山西组顶界年龄要老于华北板块南部的山西组顶界年龄; (2) 华北板块北部的下石盒子组时限极短; (3) 华北板块北部的上石盒子组和孙家沟组之间存在一个约20个百万年的地层间断, 瓜德鲁

普统可能完全缺失。

根据华北板块北部和南部的山西组顶界年龄, 华北板块中部的山西组顶界时代应属于阿瑟尔期-萨克马尔期之交。同时, 这两个年龄的比较也证实了华北板块下石盒子组顶界时代自北向南依次变新。但是目前下石盒子组的年龄报道相对较少, 只有Wu等(2021)在华北板块北部的报道。Wu等(2021)的报道揭示下石盒子组的时限很短, 不同于前人的认识。为了便于地层对比, 本文暂时将华北板块的下石盒子组视为时限很短的岩石地层单元。但未来仍需要进一步的工作去证实。而在上石盒子组和孙家沟组的时代归属上, 过去被认为标志性的沃德期(Wordian)Illawarra反转以山西太原上石盒子组下部多个正极性带为代表, 目前看来其可靠性有待进一步确认(Embleton等, 1996; Menning和Jin, 1998)。最近, Wang等(2022)虽然在内蒙古准格尔旗龙口剖面上石盒子组顶部报道有正向极性带的存在, 有可能表明龙口剖面上石盒子组顶部已经进入二叠纪-三叠纪超级反向极性带, 但由于这一带正好处于上石盒子组顶部或者与上覆孙家沟组交界那个长间断附近, 因此还有待于进一步细化研究。但是华北板块的上石盒子组和孙家沟组的植物面貌存在显著差异(Wang, 2010; Xiong等, 2021), 为这个长时间地层间断的存在提供了化石证据。在山西保德的上石盒子组和孙家沟组均有发现大量古土壤层(图2), 可能与长时间沉积间断有关。类似的古土壤层和不整合面在河南也有报道(胡社荣等, 1990; 刘和, 1990)。综合地质年代学、古植物组合和沉积学证据, 华北板块可能缺失瓜德鲁普统。因此, 本文将华北板块的上石盒子组顶界时代置于早空谷期, 将孙家沟组底界时代置于瓜德鲁普世-乐平世之交(图9)。

过去根据磁性地层特征和植物化石组合, 华北板块的二叠系-三叠系界线被置于孙家沟组和刘家沟组之间(Embleton等, 1996)。但是磁性地层特征有待进一步研究。植物化石分辨率也很低, 其他化石稀少, 叶肢介和遗迹化石组合可能提供一些有用的信息。楚道亮等(2018)报道了陕西渭北孙家沟组顶部发现的叶肢介*Euestheria gutta*-*Palaeolimnadiopsis vilujensis*组合带, 以*Euestheria*属和*Palaeolimnadiopsis*分子大量繁盛为特征。其中*E. gutta*和*P. vilujensis*在俄罗斯和德国的陆相下三叠统均广泛分布, 可以视为早三叠世印度期的指示化石(Scholze等, 2015), Chu等(2019)在陕西铜川

附近孙家沟组上部还发现了以双壳类 *Pteria ussurica variabilis*、*Promyalina schamarae* 和腕足类 *Lingula* 为代表的二叠纪-三叠纪混生生物群。根据二叠纪-三叠纪之交生物群的更替特点, 其实很多早三叠世繁盛的分子在二叠纪最晚期就已经出现(Shen等, 2019), 因此这个化石带很可能是从长兴期最晚期延上来的。而在孙家沟组顶部以上遗迹化石多样性、生物扰动强度、潜穴大小和深度以及行为复杂度等都明显降低, 指示二叠纪末生物大灭绝层位可能就在孙家沟组中上部(Chu等, 2015, 2019; Guo等, 2019; Wu等, 2020)。此外, 二叠系-三叠系界线之下的有机碳同位素负漂在全球均已识别(Zhang等, 2016; 沈树忠等, 2019)。因此, 化学地层学对识别陆相的二叠系-三叠系界线也有裨益。Lu等(2020)和Wu等(2020)的化学地层报道显示华北板块孙家沟组中部存在一个碳同位素漂移。基于Lu等(2020)和Wu等(2020)报道的该同位素漂移, 陆相二叠系-三叠系界线应该在孙家沟组中部和顶部之间(图9)。

7 讨论

7.1 海平面变化

华北板块的陆表海沉积地层(如本溪组和太原组)保存着石炭纪-二叠纪冈瓦纳冰川消长而触发海平面变化的地质记录(Isbell等, 2003)。本溪组和太原组发育数个可以作为海侵沉积记录的灰岩层, 并可在全区追踪。其中L1灰岩时代属于石炭纪-二叠纪之交, 很可能记录了华北板块石炭纪-二叠纪最大规模的海侵(吕大伟, 2009)。从华北板块的石炭纪-二叠纪地层已识别出多个2级-3级/4级海平面变化旋回(陈世悦和刘焕杰, 1995; 李增学等, 1996; Liu等, 1998; 吕大伟等, 2009)。本文将上述海平面变化的年龄归于315~296Ma, 这些海平面变化曲线不仅可与全球变化趋势对比(Hallam, 1984; Miller等, 2005; Haq和Schutter, 2008; Vérard等, 2015; van der Meer等, 2017), 而且可与日本(Nakazawa和Ueno, 2009)、韩国(Lee和Chough, 2006)、乌克兰(Eros等, 2012)和北美(Schmitz和Davydov, 2012)等地区区域性曲线进行对比。然而, 相对海平面变化的幅度仍然充满争议, 在40m以下至100m以上之间变化(Hallam, 1984; deV. Klein, 1992; Miller等, 2005; Haq和Schutter, 2008; Nakazawa和Ueno, 2009; Snedden和Liu, 2010; Artyushkov和Chekhovich, 2011; Sweet和Sore-

ghan, 2012; Vérard等, 2015; van der Meer等, 2017)。显然相对海平面变化的幅度很大程度上取决于高纬度区域的冰川体积, 即更大规模的海平面下降意味着更大的高纬度冰川形成。但是晚古生代高纬度冰川的沉积记录却指示较小的冰川体积, 不足以驱动50m以上的海平面变化(Montañez和Poulsen, 2013)。此外, 冰盖-气候模型的模拟结果表明晚古生代需要存在异常高的 $p\text{CO}_2$ 才可以驱动如此规模的海平面变化, 但这一点也与地质记录相悖(Horton和Poulsen, 2009; Horton等, 2010)。综上所述, 华北板块石炭纪-二叠纪可能的相对海平面变化幅度应为0~40m(Liu等, 1998)(图7)。

山西组以上, 华北板块的地层主要由陆相沉积岩组成, 没有全球海平面变化的记录。但是, 化石和沉积学证据显示华北板块的二叠纪陆相背景偶尔会受到海侵影响。在山西、河北和河南的山西组至上石盒子组都发现了腕足类 *Lingula* sp.(何锡麟, 1985)。 *Lingula* sp. 的出现表明华北板块的二叠纪地层并未如之前认为的那样完全形成于陆相环境。而除了海相化石, 华北板块山西组至上石盒子组中的海相沉积岩(如海绵岩、硅质岩和海绿石砂岩等)均有广泛报道, 因而华北板块在山西组和上石盒子组沉积时曾遭遇短暂的海侵(何锡麟, 1985; 陈世悦和刘焕杰, 1994, 1999)。

7.2 古气候

在石炭纪-二叠纪, 热带雨林气候仅仅存在古特提斯域内板块, 而Pangea大陆中纬度区域的大部分地区却经历着季风或干旱气候(Rees等, 1999, 2002)。作为这一群岛的一部分, 华北板块自晚巴什基尔期至早空谷期四周为热带海洋所围(Huang等, 2018), 煤在沉积地层记录中也很常见(Liu, 1990), 呈现出一个类似热带雨林气候的湿热特征(Gibbs等, 2002; Rees等, 2002; Cleal和Thomas, 2005; Hilton和Cleal, 2007; DiMichele等, 2009; Wang和Pfefferkorn, 2013; DiMichele, 2014)。然而华北板块乐平世的古气候却是截然不同, 以干热为特征。在诸多气候敏感指标中, 植物的演化可以追踪古气候的转变。

本文对华北板块石炭纪-二叠纪地层中识别出的多个植物演化事件的时代归属重新划分(王自强和王立新, 1986; Wang, 2010): 本溪组至太原组下部的植物更替事件(晚格舍尔期), 太原组上部至山西组下部的华夏植物群辐射事件(早阿瑟尔期), 上石盒子组的早

期银杏和松柏植物出现事件(晚阿瑟尔期至早空谷期)和孙家沟组底部的安加拉植物入侵事件(吴家坪期)。其中华夏植物群的繁盛与华北板块石炭纪-二叠纪的大规模成煤时间一致。另外, 3次灭绝事件也被识别出来(Stevens等, 2011), 分别发生在下石盒子组(晚阿瑟尔期), 上石盒子组中部(中亚丁斯克期)和上石盒子组上部(早空谷期)(图7), 但这些事件可能仅代表北半球中低纬度气候带的植物群演变, 并非全球性的事件。

莫斯科期至格舍尔期, 热带雨林因为受到海西(Hercynian)构造活动所致的气候干旱化影响在欧洲、北美和中亚渐渐崩溃, 而华北板块稳定的地质背景使得热带雨林得以延续和繁衍(Besly和Turner, 1983; Di-Michele等, 1996; Cleal和Thomas, 2005; Hilton和Cleal, 2007)(图7)。晚格舍尔期存在全球性的气候变暖(Phillips和Peppers, 1984; Durante, 1995), 以碳同位素负漂移作为该气候变化的响应(Zhang等, 1999; Peters-Kottig等, 2006; Nordt等, 2016)(图7)。而在华北板块则发生了一个植物更替事件: 种子蕨中原先占主导的属种(如*Linopteris*、*Paropteris*和*Reticaletopteris*(*Lonchopteris*))都灭绝, 而*Alethopteris huiana*继续存在, 之后*Neuropteris pseudovata*和*Lepidodendron posthumii*迅速成为该植物群中的主要分子(Wang, 2010)(图7)。由于晚格舍尔期变暖, 冰川融化使华北板块的海平面升高、陆地面积减少, 海水对植物的影响也更大(李宝芳等, 1999), 可能触发了这次植物更替事件。

在早阿瑟尔期, 冈瓦纳冰川的发育促使全球性的海退发生(Montañez和Poulsen, 2013)。碳同位素记录也指示了这个更凉的气候(Zhang等, 1999; Peters-Kottig等, 2006; Nordt等, 2016)(图7)。而在华北板块, 古地理格局也从陆表海转变为三角洲和潮坪等利于植物扩张的环境(Liu, 1990)。华夏植物群辐射事件很可能由较低温的古气候和较广泛的生存环境触发, 并形成了华北板块最大规模的热带雨林系统(Cleal和Thomas, 2005; Hilton和Cleal, 2007)。

从山西组(中阿瑟尔期)往上, 华北板块的古气候呈现出季节性干热的特征, 一方面抑制了煤层的发育, 另一方面促进了红层的出现(张泓等, 1999)。河漫滩沉积物和白色长石砂岩中的红色泥岩夹层可以指示这种季节性的干湿交替(Wang, 1993), 而模拟结果也刻画了这一古气候特征(Gibbs等, 2002)。由于气候的转变, 一些植物属种绝灭, 减少了热带雨林的分布面积(Stevens

等, 2011); 同时银杏和松柏等耐旱植物占据更有竞争力的生态位(Liu等, 2015)。在高精度地质年代学的约束下, 早期银杏和松柏植物的出现可以追溯到乌拉尔世(晚阿瑟尔期至早空谷期)。

长期的沉积间断使得对这次气候转变过程的精确时间难于确定。目前唯一能确认的是这个气候转变最晚不晚于卡匹敦期(Capitanian)。关于气候转变的机制, 前人认为其受控于二叠纪华北板块的北向漂移, 华北板块逐渐移动到更干旱的中纬度地区(Liu, 1990; Parrish, 1993; Enos, 1995; Li和Wu, 1996; Ziegler等, 2003; Cope等, 2005)。但是干旱化在阿瑟尔晚期就发生了, 而古地磁数据表明此时华北板块仍处于低纬度地区(Huang等, 2018)。显而易见存在其他的气候转变机制。Cope等(2005)指出华北板块北缘内蒙古古隆起隆升引发的雨影效应(Rain shadow effect)可能与这一气候转变有关。雨影效应即山地迎风坡发生地形抬升降水时, 其背风坡却因水汽不够饱和而干旱。沉积物源、古流向以及岩石学证据都揭示内蒙古古隆起隆升高度很大, 足以产生显著的雨影效应(Cope等, 2005; 张拴宏等, 2007; Wu等, 2021)。雨影效应可能是华北板块气候转变的可能机制, 但是未来仍需要深入的研究。此外, 大气二氧化碳分压的上升和晚古生代大冰期的消退也是导致气候干旱化的重要原因之一(Montañez等, 2007; Poulsen等, 2007; Tabor和Poulsen, 2008)。乌拉尔世全球的构造背景十分活跃, 以Panjal大火成岩省(Panjal Traps)、Skagerrak-Centered大火成岩省(Skagerrak-Centered Large Igneous Province, SCLIP)和塔里木大火成岩省(Tarim Large Igneous Province, TLIP)为代表的火山活动很可能释放大量二氧化碳, 在很大程度上改变了大气二氧化碳浓度(Torsvik等, 2008; Shellnutt, 2018; Yang等, 2018; Chen和Xu, 2019; Marchetti等, 2022; Wang等, 2022)。随着乌拉尔世中晚期大气二氧化碳浓度的显著上升(Richey等, 2020)以及冰川分布范围的显著减少(Garbelli等, 2019), 华北板块和全球中低纬度大部分地区也随之表现出明显的气候干旱化。

吴家坪期安加拉植物的入侵标志着华北板块漂移到更高纬度、更干旱的地区, 此时古亚洲洋已经关闭(Liu等, 2017a; Liu等, 2017b; Zhao等, 2018), 华北板块与西伯利亚板块连为一体(王自强和王立新, 1986; Wang, 2010)。孙家沟组中发育大量的红层和蒸发岩

(如钙质黏土、钙质透镜体和钙质结核)(Wang, 1993). 古植物和沉积学特征都指示了该时期常年干热的古气候特征(Chu等, 2019; Wu等, 2020).

华北板块石炭纪-二叠纪良好发育的沉积记录了该时期的古气候演化过程, 而在此基础上的定量重建为气候演化提供更好的研究视角. Yang等(2016)通过泥岩的地球化学和矿物组成来追踪化学风化强度(CIA), 采用 τ_{Na} (钠损失分数指数)-MAT(平均年温度)转换方程重建了阿瑟尔期-萨克马尔期的地表温度为 $\sim(20\pm 2.7)^{\circ}\text{C}$, 指示暖湿气候, 与华北板块的有机碳同位素记录吻合(Zhang等, 1999). 该趋势由冈瓦纳冰川的消长驱动, 继亚丁斯克期P2冰期后全球气候逐渐变暖(Montañez和Poulsen, 2013; Garbelli等, 2019). 鉴于陆相沉积地层占据了华北板块二叠系的主体, Yang等(2016)的工作对定量重建古气候更具实际意义.

7.3 火山活动

石炭纪晚期至二叠纪华北板块大地构造背景最显著的变化是其北缘安第斯型主动大陆边缘的出现和发育(Xiao等, 2003; Li, 2006; Zhang等, 2009). 华北板块北缘的内蒙古古隆起可以视为该安第斯型主动大陆边缘岩浆弧的分布范围, 以大量片麻闪长岩-花岗质岩侵入体为证据(Zhang等, 2007b; Wang等, 2018). 然而与之相关的火山岩由于晚古生代至早三叠世内蒙古古隆起的强烈隆升和暴露而剥蚀殆尽(张拴宏等, 2007).

尽管华北板块石炭纪-二叠纪最直接的火山岩记录很少, 石炭系-二叠系中的火山事件沉积是火山活动的可靠地质记录. 吕大炜等(2018)总结了该类火山事件沉积的特征. 火山事件沉积主要在华北板块北部和中部的本溪组上部、太原组和山西组发育, 包括火山角砾岩、凝灰岩、沉凝灰岩以及凝灰质碎屑岩等.

在华北板块北部, 本溪组和太原组可以识别出12个火山事件沉积序列, 由华北板块北缘的大规模火山喷发所驱动(周安朝, 2000). 在华北板块东部, 本溪组和太原组可以识别出10个火山事件沉积序列(Zhong, 1996). 华北板块中部存在3~6个火山沉积层(桑树勋等, 1999). 辽宁西部石炭系-二叠系粗粒的火山事件沉积物指示火山源是距离较近的华北板块北缘(贾炳文等, 1999). 这些火山灰很可能来源于古亚洲洋俯冲形成的内蒙古古隆起岩浆弧(Zhang等, 2007a; 张拴宏等, 2010).

在本文时间框架的约束下, 这些火山事件沉积物形成于莫斯科期至阿瑟尔期, 与内蒙古古隆起片麻质闪长岩-花岗质岩侵入体主阶段一致. 火山事件沉积物成分涵盖安山质、英安质和流纹质, 揭示最可能的火山源应是一个安第斯型主动大陆边缘岩浆弧.

过去认为“G”层铝土矿是下伏中奥陶统碳酸盐岩的风化产物(孟祥化等, 1987). 但是最新研究表明“G”层铝土矿最可能来自石炭纪晚期华北板块北缘内蒙古古隆起的火山活动(Liu等, 2014b). “G”层铝土矿有大量岩浆成因锆石的报道(Wang等, 2010; 赵越等, 2010; Liu等, 2014b; Wang等, 2016). 碎屑锆石的U-Pb年龄和原位Hf同位素分析指示锆石年龄主要为石炭纪晚期, 与晚古生代华北板块北缘内蒙古古隆起的俯冲相关火山活动时间一致; 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $-24.5\sim 2.2$, 主要为负值, 与内蒙古古隆起古生代岩浆弧的锆石数据一致, 但与中亚造山带古生代岩浆岩锆石数据的正值截然不同(Liu等, 2014b).

内蒙古古隆起的火山为华北板块石炭系-二叠系带来大量火山碎屑. 但是内蒙古古隆起似乎并不是唯一的火山源. 相关研究发现华北板块石炭纪-二叠纪在东缘、南缘甚至内部可能发育火山活动(Zhang, 1997; 张开均, 1998; 孟祥化和葛铭, 2001; 孙蓓蕾等, 2014; Zhu等, 2014), 东缘的火山活动可能与古太平洋板块的俯冲有关(Zhang, 1997). 受限于不完整的地质记录, 阐明华北板块的火山活动仍困难重重, 急需未来的研究.

7.4 构造活动

华北板块自奥陶纪晚期升出海平面以后直至石炭纪晚期才再一次接受沉积. 本文总结的新的时间框架最显著的部分是上石盒子组和孙家沟组之间巨大的沉积间断, 这可能是区域构造活动的结果. 古亚洲洋形成于新元古代, 经历了漫长的构造演化, 横跨西至中亚、东至俄罗斯远东的广大区域(Şengör等, 1993; Şengör和Natal'in, 1996; Xiao等, 2003; Windley等, 2007; Kröner等, 2010; Xiao等, 2015). 古亚洲洋分离了东亚板块(如华北板块、塔里木板块和柴达木板块等)和西伯利亚-东欧板块, 其闭合意味着华北板块、塔里木板块以及柴达木板块等与西伯利亚-东欧板块相接作为Pangea大陆的一部分(Zhao等, 2018). 但是古亚洲洋的闭合时间仍然充满争议, 大致范围在晚泥盆世至三叠纪(Xiao等, 2003; Zhang等, 2009; Kröner等, 2010; Cocks和

Torsvik, 2013; Xiao等, 2015; Zhu和Ren, 2017; Eizenhöfer和Zhao, 2018; Niu等, 2021; Tian等, 2020; Zhang等, 2020).

最近越来越多证据表明古亚洲洋的最终闭合是剪刀式的(Wang等, 2021), 从西往东渐晚, 在华北和东北地区于瓜德鲁普世-乐平世最终完全关闭, 到日本可能关闭更晚于二叠纪. 乌拉尔世华北板块北缘的构造背景是主动大陆边缘弧(王婉琼等, 2013; 张磊等, 2013; Lin等, 2014; 杨奇获等, 2014). 但是瓜德鲁普世岩浆岩形成于碰撞后背景, 揭示碰撞不晚于瓜德鲁普世(Lin等, 2014; Shi等, 2014; Liao等, 2019; Zhou H等, 2019). 280~265Ma, 锆石Hf(*T*)值和全岩Nd(*T*)值从基性岩浆岩特征迅速变化为中性岩浆岩特征, 同样指示俯冲构造背景到碰撞后构造背景的转变(Eizenhöfer等, 2015a, 2015b).

类似的沉积间断在整个古亚洲洋构造域均有报道. Yang等(2010, 2021)报道了吐鲁番盆地乌拉尔统和乐平统之间的地层缺失, 该缺失时段为283.5~265.1Ma, 持续近18个百万年. 考虑到二叠纪准噶尔盆地、吐鲁番盆地和哈密盆地有着统一的古亚洲洋沉积环境和构造背景, 类似的地层缺失在新疆北部可能普遍存在(Gao等, 2020; Wu等, 2021). 这个地层缺失在时间上与古亚洲洋西段的闭合时间310~285Ma一致, 因此, 很可能与古亚洲洋西段的闭合有关(Han和Zhao, 2018; Zhao等, 2018). 对于古亚洲洋中段闭合的沉积响应, 袁效奇和耿国仓(1992)报道了阿拉善地区瓜德鲁普统和乐平统的缺失, 该地层缺失很可能是古亚洲洋中段长期俯冲和闭合的结果(Liang等, 2020). 华北板块石炭纪-二叠纪地层的火山灰层也是古亚洲洋向华北板块俯冲的记录(Wang等, 2020, 详细讨论见7.3). 内蒙古古隆起的隆升过程支持古亚洲中段在280~265Ma闭合的观点(Eizenhöfer等, 2015b; Eizenhöfer和Zhao, 2018; Zhao等, 2018). 华北板块石炭系-二叠系得到的大部分晚古生代碎屑锆石呈现出 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 负值, 与内蒙古古隆起的岩浆锆石数值一致, 指示物源来自内蒙古古隆起(Li等, 2010; Ma等, 2014; Zhu等, 2014; Zhou等, 2017; Zhou R等, 2019).

另外, 古生物学和生物古地理证据也支持古亚洲洋在瓜德鲁普世闭合的观点. 孙家沟组底部发现的安加拉植物入侵可以证明古亚洲洋闭合时间不晚于259Ma(王自强和王立新, 1986; Li, 2006; Wang, 2010).

但是长期的地层缺失难以确定安加拉植物最早入侵的时间. 腕足动物北方过渡带反映了北方大区冷水动物群和古赤道大区暖水动物群的混合, 形成于瓜德鲁普世(Shi等, 1995; 王成文和张松梅, 2003; 张松梅和王成文, 2004; Shen等, 2006). 北方过渡带很可能受控于洋流和古亚洲洋的闭合(Shi, 2006; Shen等, 2009).

8 结论

本文总结了最新的石炭纪-二叠纪地层框架并修订了华北板块的生物地层对比格架. 华北板块自奥陶纪晚期升出海平面以后直到晚石炭世才开始接受沉积. 最早的石炭纪地层本溪组属于早巴什基尔期至早格舍尔期, 太原组属于晚格舍尔期至早阿瑟尔期, 山西组和下石盒子组属于中、晚阿瑟尔期, 上石盒子组属于萨克马尔期至早空谷期, 孙家沟组属于乐平世. 上石盒子组和孙家沟组之间可能存在近20个百万年的沉积间断, 这个间断表现为厚层砾岩层底部的古冲刷面或者由多层古土壤层组成, 因此, 华北板块瓜德鲁普世地层可能完全缺失或者大部分缺失.

华北板块石炭纪-二叠纪相对海平面升降幅度在0~40m快速变化, 大规模海侵期要较先前发生更早持续更短, 集中在早、中阿瑟尔期. 中阿瑟尔期以后华北板块整体为陆相环境, 受到海水影响较少. 植物组合、沉积学证据以及有机碳同位素记录都表明气候温暖湿润的成煤期较之先前的认识发生的更早, 持续得更短. 而该气候温暖湿润时期也与大规模海侵时期耦合. 适宜的古气候和古地理条件促进了煤炭等资源的生成和聚集. 自中阿瑟尔期, 华北板块古气候呈现出季节性干旱的特征, 乐平世古气候已表现为完全干旱的特征. 但确切的古气候转折时间仍不能精确确定. 古气候触发机制最可能与华北板块在古亚洲洋闭合抬升而引发的雨影效应有关. 古亚洲洋构造域石炭纪-二叠纪的火山活动在华北板块留下了丰富的记录. 除了石炭系-二叠系的火山灰层外, G型铝土矿也被认为与火山活动密切相关. 华北板块上石盒子组和孙家沟组之间的沉积间断, 可能是古亚洲洋在瓜德鲁普世闭合而导致华北板块抬升的沉积响应. 类似的沉积响应在吐哈盆地和阿拉善地块也有报道, 揭示整个古亚洲洋构造域很多地区可能都有类似的沉积缺失.

致谢 感谢两位匿名评审人提出的宝贵建议.

参考文献

- 陈世悦, 刘焕杰. 1994. 华北石炭-二叠纪层序地层学研究的特点. 岩相古地理, 14: 11–20
- 陈世悦, 刘焕杰. 1995. 华北晚古生代海平面变化研究. 岩相古地理, 15: 14–21
- 陈世悦, 刘焕杰. 1999. 华北石炭-二叠纪层序地层格架及其特征. 沉积学报, 17: 63–74
- 程政武. 1980. 七、脊椎动物. 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. 北京: 地质出版社. 115–170
- 楚道亮, 缪雪, 吴玉祥, 郭文伟, 舒文超, 童金南. 2018. 陕西渭北二叠纪-三叠纪之交叶肢介化石及其地层对比. 地球科学, 43: 110–121
- 丁惠, 马倩, 万世禄. 1991. 辽东-吉南地区晚石炭世牙形石生物地层. 山西矿业学院学报, 9: 132–142, 145
- 杜宽平. 1958. 对太原西山月门沟煤系的新见. 地质论评, 18: 35–44, 90
- 范炳恒, 何锡麟. 1999. 华北地台晚古生代腕足动物群及其地层研究. 徐州: 中国矿业大学出版社. 179
- 范炳恒, 何锡麟, 沈树忠. 1997. 华北地台晚古生代腕足动物群研究. 中国矿业大学学报, 2: 89–94
- 高克勤. 1983. 山西柳林的锯齿龙类化石. 古脊椎动物与古人类, 21: 19–29
- 高莲凤, 丁惠, 万晓樵. 2005. 豫淮盆地太原组顶部斯威特刺(*Sweetognathus*)种的分类修正及其地层意义. 微体古生物学报, 22: 370–382
- 耿国仓. 1985a. 鄂尔多斯盆地晚石炭世孢粉组合. 植物学报, 27: 208–215
- 耿国仓. 1985b. 陕甘宁盆地西部中石炭世晚期孢粉组合. 植物学报, 27: 652–660
- 韩同相. 1987. 太原西山月门沟群的划分与对比, 太原西山含煤地层沉积环境. 北京: 煤炭工业出版社. 211–327
- 何锡麟. 1985. 华北地台晚古生代地层研究的新进展. 中国矿业学院学报, 2: 65–75
- 何锡麟, 张玉瑾, 朱梅丽, 张桂芸, 庄寿强, 曾勇, 宋萍. 1990. 内蒙古格尔旗晚古生代含煤地层与生物群. 徐州: 中国矿业大学出版社. 407
- 何锡麟, 朱梅丽, 范炳恒, 庄寿强, 丁惠, 薛庆远. 1995. 山西太原东山晚古生代地层划分对比及古生物研究. 长春: 吉林大学出版社. 149
- 侯静鹏, 欧阳舒. 2000. 山西柳林孙家沟组孢粉植物群. 古生物学报, 39: 356–368
- 胡社荣, 高文泰, 刘和. 1990. 平顶山砂岩段底界不整合面的发现及河南二叠-三叠系界限争议. 煤田地质与勘探, 4: 12–15, 71–72
- 贾炳文, 周安朝, 谷东起. 1999. 辽西地区晚古生代火山事件沉积地球化学特征及物源区分析. 沉积学报, 3: 3–5
- 贾映月, 丁惠, 张卫民. 1994. 淮南煤田太原组牙形石生物地层. 山西矿业学院学报, 2: 50–59
- 蒋汉朝, 王明镇, 张锡麒, 李增学. 2001. 山东济宁煤田东区太原组蠕类动物群. 古生物学报, 40: 514–522
- 金玉珂, 尚庆华, 侯静鹏, 李莉, 王玉净, 朱自力, 费淑英. 2000. 中国地层典·二叠系. 北京: 地质出版社. 149
- 孔宪祯, 许惠龙, 李润兰, 常江林, 刘陆军, 赵修舘, 张遵信, 廖卓庭, 朱怀诚. 1996. 山西晚古生代含煤地层和古生物群. 太原: 山西科学技术出版社. 280
- 李宝芳, 温显端, 李贵东. 1999. 华北石炭、二叠系高分辨层序地层分析. 地学前缘, 6: 81–94
- 李洪颜, 徐义刚, 黄小龙, 何斌, 罗震宇, 燕滨. 2009. 华北克拉通北缘晚古生代活化: 山西宁武-静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石U-Pb测年及Hf同位素证据. 科学通报, 54: 632–640
- 李锦玲, 程政武. 1997. 记内蒙古大青山-晚二叠世的大鼻龙类. 见: 童永生, 张银运, 吴文裕, 李锦玲, 史立群主编. 演化的实证——纪念杨钟健教授百年诞辰论文集. 北京: 海洋出版社. 119–124
- 李献华, 柳小明, 刘勇胜, 苏犁, 孙卫东, Huang H Q, Yi K. 2015. LA-ICPMS锆石U-Pb定年的准确度: 多实验室对比分析. 中国科学: 地球科学, 45: 1294–1303
- 李星学. 1964. 中国晚古生代陆相地层. 北京: 科学出版社
- 李星学. 1995. 中国地质时期植物群. 广州: 广东科技出版社. 1–695
- 李星学, 盛金章. 1956. 太原西山的月门沟系并论太原统与山西统的上下界线问题. 地质学报, 36: 87–146
- 李增学, 魏久传, 王明镇, 李守春. 1996. 华北南部晚古生代陆表海盆地层序地层格架与海平面变化. 岩相古地理, 16: 1–11
- 梁湘沅. 1994. 河南荥阳-巩县地区太原组蠕带. 地层学杂志, 18: 189–195
- 林又玲, 毛桂英. 1990. 焦作地区太原组牙形刺化石及其组合特征. 焦作矿业学院学报, 1: 30–37
- 刘超, 孙蓓蕾, 曾凡桂. 2014. 太原西山上二叠统-下三叠统地层最大沉积年龄的碎屑锆石U-Pb定年约束. 地质学报, 88: 1579–1887
- 刘锋. 2009. 山西保德晚石炭世-二叠纪孢粉生物地层学研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–298
- 刘和. 1990. 河南古生代末箕山运动刍议. 中国煤田地质, 2: 33–36
- 刘俊. 2018. 中国陆相二叠、三叠纪地层年代对比新进展. 古脊椎动物学报, 56: 327–342
- 卢立伍, 陈晓云. 2010. 中国石炭-二叠纪脊椎动物研究回顾. 见: 董为主编. 第十二届中国古脊椎动物学学术年会论文集. 北京: 海洋出版社. 1–12
- 罗顺社, 潘志远, 吕奇奇, 何维领, 文硕. 2017. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界碎屑锆石U-Pb年龄及其构造意义. 中国地质, 44: 556–574
- 吕大伟. 2009. 华北晚古生代海侵事件沉积及古地理特征研究. 博士学位论文. 青岛: 山东科技大学. 1–192

- 吕大伟, 高志武, 李增学, 王东东, 刘海燕, 路长勇, 韩乔羽, 范文贵. 2018. 华北石炭-二叠系火山事件沉积研究进展. 煤炭科学技术, 46: 9-18
- 吕大伟, 李增学, 刘海燕, 郭建斌, 刘彬彬, 孟召磊. 2009. 华北晚古生代海平面变化及其层序地层响应. 中国地质, 36: 1079-1086
- 马收先, 孟庆任, 曲永强. 2011. 华北地块北缘上石炭统-中三叠统碎屑锆石研究及其地质意义. 地质通报, 30: 1485-1500
- 煤炭科学研究院地质勘探分院. 1987. 太原西山含煤地层沉积环境. 北京: 煤炭工业出版社. 1019
- 孟祥化, 葛铭. 2001. 中国华北地台二叠纪前陆盆地的发现及其证据. 地质科技情报, 20: 8-14
- 孟祥化, 葛铭, 肖增起. 1987. 华北石炭纪含铝建造沉积学研究. 地质学报, 61: 182-197
- 欧阳舒, 侯静鹏. 1999. 论华夏孢粉植物群特征. 古生物学报, 38: 261-290
- 欧阳舒, 卢礼昌, 朱怀诚, 刘锋. 2017. 中国晚古生代孢粉化石. 合肥: 中国科学技术出版社. 1092
- 全国地层委员会. 2014. 中国地层表. 地球学报, 35
- 芮琳, 张遵信. 1986. 论石炭系与二叠系的分界. 地层学杂志, 10: 249-261
- 桑树勋, 刘焕杰, 贾玉如. 1999. 华北中部太原组火山事件层与煤岩层对比——火山事件层的沉积学研究及展布规律. 中国矿业大学学报, 28: 46-62
- 邵龙义, 董大啸, 李明培, 王海生, 王东东, 鲁静, 郑明泉, 程爱国. 2014. 华北石炭-二叠纪层序-古地理及聚煤规律. 煤炭学报, 39: 1725-1734
- 沈树忠, 张华, 张以春, 袁东勋, 陈波, 何卫红, 牟林, 林巍, 王文倩, 陈军, 吴琼, 曹长群, 王玥, 王向东. 2019. 中国二叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 160-193
- 沈树忠, 徐海鹏, 袁东勋, 王玥, 王军, 张以春, 王小娟, 牟林, 吴琼. 2020. 中国二叠纪地层及标准化石图集. 杭州: 浙江大学出版社. 1-382
- 盛金章. 1958. 太子河流域本溪统的蜓科化石. 中国古生物志, 新乙种, 7: 1-119
- 盛金章. 1962. 中国的二叠系. 北京: 科学出版社. 1-95
- 盛金章, 王仁农. 1982. 江苏北部大屯煤田的含蜓地层及蜓类动物群. 科学通报, 3: 192
- 宋俊俊, 宋慧波, 胡斌. 2014. 豫西北太原组的时代: 来自蜓类化石的证据. 微体古生物学报, 31: 190-204
- 孙蓓蕾, 曾凡桂, 刘超, 崔秀琦, 王威. 2014. 太原西山上古生界含煤地层最大沉积年龄的碎屑锆石U-Pb定年约束及地层意义. 地质学报, 88: 185-197
- 万世禄, 丁惠. 1984. 太原西山石炭世牙形刺初步研究. 地质评论, 30: 409-415
- 万世禄, 丁惠. 1987. 华北地台石炭、二叠纪牙形石研究新发现及其地质意义. 煤炭学报, 1: 13-16
- 万世禄, 丁惠, 赵松银. 1983. 华北中、晚石炭世牙形石生物地层. 煤炭学报, 2: 62-72
- 王成文, 张松梅. 2003. 哲斯腕足动物群. 北京: 地质出版社. 210
- 王成源, 康沛泉. 2000. 中国二叠系的底界. 微体古生物学报, 17: 378-387, 490
- 王军有, 伊剑, 刘俊. 2019. 中国第一个完整的锯齿龙头骨. 古生物学报, 58: 216-221
- 王明镇, 张锡麒, 赵秀丽. 2004. 鲁西地区二叠系上、下石盒子组孢粉组合及其分界. 古生物学报, 43: 349-365
- 王挽琼, 徐仲元, 刘正宏, 赵庆英, 蒋孝君. 2013. 华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性: 来自花岗岩类锆石U-Pb年代学及地球化学的制约. 岩石学报, 29: 2987-3003
- 王向东, 胡科毅, 郗文昆, 盛青怡, 陈波, 林巍, 要乐, 王秋来, 祁玉平, 陈吉涛, 廖卓庭, 宋俊俊. 2019. 中国石炭纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 139-159
- 王艳鹏, 杨文涛, 祁帅帅. 2020. 华北克拉通南缘古-中生代构造转换期的泥岩地球化学特征响应. 河南理工大学学报(自然科学版), 39: 27-37
- 王玉净, 袁效奇, 耿国仓. 1992. 鄂尔多斯盆地石炭纪蜓类研究新进展及其古地貌面貌初探. 微体古生物学报, 9: 127-144
- 王钰, 金玉环, 方大衍. 1964. 中国的腕足动物化石. 北京: 科学出版社. 56-81
- 王钰, 卢衍豪, 杨敬之, 穆恩之, 盛金章. 1954. 辽东太子河流域地层(II). 地质学报, 34: 6-133
- 王志浩. 1991. 中国石炭-二叠系界线地层的牙形刺兼论石炭-二叠系界线. 古生物学报, 30: 6-41
- 王志浩, 李润兰. 1984. 山西太原组牙形刺的发现. 古生物学报, 23: 64-140
- 王志浩, 祁玉平. 2003. 我国北方石炭-二叠系牙形刺序列再认识. 微体古生物学报, 20: 225-243
- 王志浩, 张文生. 1985. 河南禹县太原组上部牙形刺的发现. 地层学杂志, 9: 228-230
- 王竹泉. 1926. 中国地质图太原榆林幅说明书. 南京: 中央地质研究所
- 王自强, 王立新. 1986. 华北石千峰群下部晚二叠世植物化石. 中国地质科学院天津地质矿产研究所文集, 15: 1-80
- 汪增荫. 1997. 第三章 含煤地层的多重划分. 见: 尚冠雄主编. 华北地台晚古生代煤地质学研究. 太原: 山西科学技术出版社. 13-82
- 吴汉宁, 朱日祥, 刘椿, 常承林. 1990. 华北地块晚古生代至三叠纪古地磁研究新结果及其构造意义. 地球物理学报, 33: 694-701
- 杨关秀. 1985. 豫西禹县晚古生代含煤地层植物群顺序及区域地层的重新解释. 地球科学——武汉地质学院学报, 10: 145-161
- 杨关秀. 2006. 中国豫西二叠纪华夏植物群-禹州植物群. 北京: 地质出版社. 361
- 杨敬之, 王水. 1956. 山西省东南部石炭纪及二叠纪地层. 地质学报, 36: 113-214

- 杨奇荻, 张磊, 王涛, 史兴俊, 张建军, 童英, 郭磊, 耿建珍. 2014. 内蒙古阿拉善地块北缘沙拉扎山晚石炭世岩体地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 33: 776–787
- 杨钟健. 1979. 河南济源一新晚二叠世动物群. 古脊椎动物与古人类, 17: 99–113
- 杨钟健, 叶祥奎. 1963. 锯齿龙类在我国的初次发现. 古脊椎动物学报, 7: 3–22
- 袁效奇, 耿国仓. 1992. 巴彦浩特盆地东部古生代沉积的发现及其大地构造意义. 石油与天然气地质, 13: 381–389
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29: 24–36
- 翟明国. 2013. 中国主要古陆与联合大陆的形成——综述与展望. 中国科学: 地球科学, 43: 1583–1606
- 张泓, 沈光隆, 何宗莲. 1999. 华北板块晚古生代古气候变化对聚煤作用的控制. 地质学报, 73: 131–139
- 张开均. 1998. 华北板块东缘晚古生代火山活动及其大地构造含义. 中国煤田地质, 10: 3–5
- 张磊, 史兴俊, 张建军, 杨奇荻, 童英, 王涛. 2013. 内蒙古阿拉善北部陶豪托西圈辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征. 地质通报, 32: 1536–1547
- 张松梅, 王成文. 2004. 兴蒙造山带中二叠世至晚三叠世腕足动物古生物地理归属. 地球科学进展, 19: 70–73
- 张遵信, 周建平, 牛保祥, 王虹. 1987. 山东淄博地区威宁期的蜓. 微体古生物学报, 4: 247–264
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代——早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29: 824–842
- 张拴宏, 赵越, 刘健, 胡健民, 陈正乐, 李森, 裴军令, 陈振宇, 周剑雄. 2007. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义. 岩石学报, 23: 625–638
- 张宜. 2009. 山西保德晚古生代植物群. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–146
- 张元动, 詹仁斌, 甄勇毅, 王志浩, 袁文伟, 方翔, 马譞, 张俊鹏. 2019. 中国奥陶纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 66–92
- 张志存. 1983. 太原西山上石炭统太原组的蜓类分带. 地层学杂志, 7: 272–279
- 张志存, 夏国英. 1985. 晋东南上石炭统山西组的蜓类分带. 中国区域地质, 2: 53–61
- 张志存. 1990. 太原西山晚石炭世蜓类的再研究. 微体古生物学报, 7: 95–122
- 张子福, 赵立萍. 1990. 陕西铜川地区上石炭统太原组的孢粉组合. 西北地质, 2: 6–12
- 赵松银, 万世禄. 1983. 唐山上石炭统开平组牙形石的发现及其意义. 中国地质科学院天津地质矿产研究所刊, 4: 97–111
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡健民, 刘健, 裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质, 37: 900–915
- 周安朝. 2000. 华北地块北缘晚古生代盆地演化及盆山耦合关系. 博士学位论文. 西安: 西北大学. 1–144
- 周建平, 张遵信, 王玉净, 杨群. 2000. 中国二叠纪蜓类生物地理分区. 地层学杂志, 24: 378–381
- 朱怀诚. 2001. 中国石炭系孢粉组合带序列. 微体古生物学报, 18: 48–54
- 朱怀诚, 欧阳舒, 高峰, 姜尧发. 2002. 天津张贵庄晚二叠世孢粉植物群. 古生物学报, 41: 53–71
- 朱日祥, 周忠和, 孟庆任. 2020. 华北克拉通破坏对地表地质与陆地生物的影响. 科学通报, 65: 2954–2965
- 朱扬珑. 1989. 内蒙古大青山地区二齿兽化石的发现. 古脊椎动物学报, 27: 9–27
- Artyushkov E V, Chekhovich P A. 2011. Sea level changes and rapid crustal movements in cratonic areas in the Late Paleozoic. *Russ Geol Geophys*, 52: 1236–1255
- Besly B M, Turner P. 1983. Origin of red beds in a moist tropical climate (Etruria Formation, Upper Carboniferous, UK). In: Wilson R C L, ed. *Residual Deposits*. London: Geological Society. 131–147
- Birgenheier L P, Frank T D, Fielding C R, Rygel M C. 2010. Coupled carbon isotopic and sedimentological records from the Permian System of eastern Australia reveal the response of atmospheric carbon dioxide to glacial growth and decay during the late Palaeozoic Ice Age. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 286: 178–193
- Brocklehurst N, Dunne E M, Cashmore D D, Fröbisch J. 2018. Physical and environmental drivers of Paleozoic tetrapod dispersal across Pangaea. *Nat Commun*, 9: 5216
- Buggisch W, Wang X D, Alekseev A S, Joachimski M M. 2011. Carboniferous-Permian carbon isotope stratigraphy of successions from China (Yangtze platform), USA (Kansas) and Russia (Moscow Basin and Urals). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 301: 18–38
- Campi M J. 2012. The Permian—A time of major evolutions and revolutions in the history of life. In: Talent J A, ed. *Earth and Life: Global Biodiversity, Extinction Intervals and Biogeographic Perturbations Through Time*. Dordrecht: Springer Netherlands. 705–718
- Cao C Q, Wang W, Liu L J, Shen S Z, Summons R E. 2008. Two episodes of ^{13}C -depletion in organic carbon in the latest Permian: Evidence from the terrestrial sequences in northern Xinjiang, China. *Earth Planet Sci Lett*, 270: 251–257
- Chen B, Joachimski M M, Wang X D, Shen S Z, Qi Y P, Qie W K. 2016. Ice volume and paleoclimate history of the Late Paleozoic Ice Age from conodont apatite oxygen isotopes from Naqing (Guizhou, China). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 448: 151–161
- Chen J, Xu Y G. 2019. Establishing the link between Permian volcanism and biodiversity changes: Insights from geochemical

- proxies. *Gondwana Res*, 75: 68–96
- Chen J Y, Liu J. 2020. The youngest occurrence of embolomeres (Tetrapoda: Anthracosauria) from the Sunjiagou Formation (Lopingian, Permian) of North China. *Foss Rec*, 23: 205–213
- Chernykh V V, Chuvashov B I, Shen S Z, Henderson C M, Yuan D X, Stephenson M H. 2020. The global stratotype section and point (GSSP) for the base- Sakmarian Stage (Cisuralian, Lower Permian). *Episodes*, 43: 961–979
- Chu D L, Tong J N, Song H J, Benton M J, Bottjer D J, Song H Y, Tian L. 2015. Early Triassic wrinkle structures on land: Stressed environments and oases for life. *Sci Rep*, 5: 10109
- Chu D L, Tong J N, Benton M J, Yu J X, Huang Y F. 2019. Mixed continental-marine biotas following the Permian-Triassic mass extinction in South and North China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 519: 95–107
- Cleal C J, Thomas B A. 2005. Palaeozoic tropical rainforests and their effect on global climates: Is the past the key to the present? *Geobiology*, 3: 13–31
- Cocks L R M, Torsvik T H. 2013. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia. *Earth-Sci Rev*, 117: 40–79
- Cope T, Ritts B D, Darby B J, Fildani A, Graham S A. 2005. Late Paleozoic sedimentation on the northern margin of the north China Block: Implications for regional tectonics and climate change. *Int Geol Rev*, 47: 270–296
- Coutts D S, Matthews W A, Hubbard S M. 2019. Assessment of widely used methods to derive depositional ages from detrital zircon populations. *Geosci Front*, 10: 1421–1435
- Klein G. 1992. Climatic and tectonic sea-level gauge for Midcontinent Pennsylvanian cyclothems. *Geology*, 20: 363–366
- DiMichele W A. 2014. Wetland-dryland vegetational dynamics in the Pennsylvanian ice age tropics. *Int J Plant Sci*, 175: 123–164
- DiMichele W A, Kerp H, Tabor N J, Looy C V. 2008. The so-called “Paleophytic-Mesophytic” transition in equatorial Pangea—Multiple biomes and vegetational tracking of climate change through geological time. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 268: 152–163
- DiMichele W A, Montañez I P, Poulsen C J, Tabor N J. 2009. Climate and vegetational regime shifts in the late Paleozoic ice age earth. *Geobiology*, 7: 200–226
- DiMichele W A, Pfefferkorn H W, Gastaldo R A. 2001. Response of Late Carboniferous and Early Permian plant communities to climate change. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 29: 461–487
- DiMichele W A, Pfefferkorn H W, Phillips T L. 1996. Persistence of Late Carboniferous tropical vegetation during glacially driven climatic and sea-level fluctuations. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 125: 105–128
- Durante M V. 1995. Reconstruction of Late Paleozoic climatic changes in Angaraland according to phytogeographic data. *Stratigr Geol Correl*, 3: 123–133
- Eizenhöfer P R, Zhao G C, Sun M, Zhang J, Han Y G, Hou W Z. 2015a. Geochronological and Hf isotopic variability of detrital zircons in Paleozoic strata across the accretionary collision zone between the North China craton and Mongolian arcs and tectonic implications. *GSA Bull*, 127: 1422–1436
- Eizenhöfer P R, Zhao G C, Zhang J, Han Y G, Hou W Z, Liu D X, Wang B. 2015b. Geochemical characteristics of the Permian basins and their provenances across the Solonker Suture Zone: Assessment of net crustal growth during the closure of the Palaeo-Asian Ocean. *Lithos*, 224–225: 240–255
- Eizenhöfer P R, Zhao G C. 2018. Solonker Suture in East Asia and its bearing on the final closure of the eastern segment of the Palaeo-Asian Ocean. *Earth-Sci Rev*, 186: 153–172
- Embleton B J J, McElhinny M W, Ma X G, Zhang Z K, Li Z X. 1996. Permo-Triassic magnetostratigraphy in China: The type section near Taiyuan, Shanxi Province, North China. *Geophys J Int*, 126: 382–388
- Enos P. 1995. The Permian of China. In: Scholle P, Peryt T, Ulmer-Scholle D, ed. *The Permian of Northern Pangea*. Vol. 2: Sedimentary Basins and Economic Resources. Berlin: Springer. 225–256
- Eros J M, Montañez I P, Osleger D A, Davydov V I, Nemyrovska T I, Poletaev V I, Zhykalyak M V. 2012. Sequence stratigraphy and onlap history of the Donets Basin, Ukraine: Insight into Carboniferous icehouse dynamics. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 313–314: 1–25
- Falcon-Lang H J, DiMichele W A. 2010. What happened to the coal forests during Pennsylvanian glacial phases? *Palaos*, 25: 611–617
- Feng Z, Wang J, Zhou W M, Wan M L, Pšenička J. 2021. Plant-insect interactions in the early Permian Wuda Tuff Flora, North China. *Rev Palaeobot Palynol*, 294: 104269
- Forte G, Kustatscher E, Roghi G, Preto N. 2018. The Permian (Kungurian, Cisuralian) palaeoenvironment and palaeoclimate of the Tregiovo Basin, Italy: Palaeobotanical, palynological and geochemical investigations. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 495: 186–204
- Gao Y, Huang H, Tao H F, Carroll A R, Qin J M, Chen J Q, Yuan X G, Wang C S. 2020. Palaeoenvironmental setting, mechanism and consequence of massive organic carbon burial in the Permian Junggar Basin, NW China. *J Asian Earth Sci*, 194: 104222
- Garbelli C, Shen S Z, Immenhauser A, Brand U, Buhl D, Wang W Q, Zhang H, Shi G R. 2019. Timing of Early and Middle Permian deglaciation of the southern hemisphere: Brachiopod-based ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr

- calibration. *Earth Planet Sci Lett*, 516: 122–135
- Gastaldo R A, DiMichele W A, Pfefferkom H W. 1996. Out of the icehouse into the greenhouse: A Late Paleozoic analog for modern global vegetational change. *GSA Today*, 6: 1–40
- Gibbs M T, Rees P M A, Kutzbach J E, Ziegler A M, Behling P J, Rowley D B. 2002. Simulations of Permian climate and comparisons with climate-sensitive sediments. *J Geol*, 110: 33–55
- Guo W W, Tong J N, Tian L, Chu D L, Bottjer D J, Shu W C, Ji K X. 2019. Secular variations of ichnofossils from the terrestrial Late Permian-Middle Triassic succession at the Shichuanhe section in Shaanxi Province, North China. *Glob Planet Change*, 181: 102978
- Hallam A. 1984. Pre-Quaternary sea-level changes. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 12: 205–243
- Halle T G. 1927. Paleozoic plants from central Shansi. *Palaeontol Sin Ser A*, 2: 1–316
- Han Y G, Zhao G C. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Earth-Sci Rev*, 186: 129–152
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322: 64–68
- Henderson C M. 2018. Permian conodont biostratigraphy. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 450: 119–142
- Hilton J, Cleal C J. 2007. The relationship between Euramerican and Cathaysian tropical floras in the Late Palaeozoic: Palaeobiogeographical and palaeogeographical implications. *Earth-Sci Rev*, 85: 85–116
- Horton D E, Poulsen C J. 2009. Paradox of late Paleozoic glacioeustasy. *Geology*, 37: 715–718
- Horton D E, Poulsen C J, Pollard D. 2010. Influence of high-latitude vegetation feedbacks on late Palaeozoic glacial cycles. *Nat Geosci*, 3: 572–577
- Hounslow M W, Balabanov Y P. 2018. A geomagnetic polarity timescale for the Permian, calibrated to stage boundaries. In: Lucas S G, Shen S Z, ed. *The Permian Timescale*. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 450: 61–103
- Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, Zhang D H, Yi Z Y, Yu S, Zhou T H. 2018. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times. *Earth-Sci Rev*, 186: 8–36
- Isbell J L, Miller M F, Wolfe K L, Lenaker P A. 2003. Timing of late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of northern hemisphere cyclotherms? In: Chan M A, Archer A W, eds. *Extreme Depositional Environments: Mega End Members in Geologic Time*. Boulder: Geological Society of America Special Paper. 5–24
- Jin Y G, Shang Q H, Cao C Q. 2000. Late Permian magnetostratigraphy and its global correlation. *Chin Sci Bull*, 45: 698–705
- Kröner A, Lehmann J, Schulmann K, Demoux A, Lexa O, Tomurhuu D, Stipska P, Liu D Y, Wingate M T D. 2010. Lithostratigraphic and geochronological constraints on the evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia: Early Paleozoic rifting followed by late Paleozoic accretion. *Am J Sci*, 310: 523–574
- Lee H S, Chough S K. 2006. Sequence stratigraphy of Pyeongan Supergroup (Carboniferous-Permian), Taebaek area, mid-east Korea. *Geosci J*, 10: 369–389
- Lee J S, Chao Y T. 1926. Classification and correlation of Paleozoic coal-bearing formation in north China. *Bull Geol Soc China*, 5: 9–14
- Li H Y, He B, Xu Y G, Huang X L. 2010. U-Pb and Hf isotope analyses of detrital zircons from Late Paleozoic sediments: Insights into interactions of the North China Craton with surrounding plates. *J Asian Earth Sci*, 39: 335–346
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *J Asian Earth Sci*, 26: 207–224
- Li X W, Liu J. 2013. New specimens of pareiasaurs from the Upper Permian Sunjiagou Formation of Liulin, Shanxi and their implications for the taxonomy of Chinese pareiasaurs. *Vertebr Palasiat*, 51: 199–204
- Li X X, Wu X Y. 1996. Late paleozoic phytogeographic provinces in China and its adjacent regions. *Rev Palaeobot Palynol*, 90: 41–62
- Liang J W, Ma X J, Tao W X. 2020. Detrital zircon U-Pb ages of Middle-Late Permian sedimentary rocks from the southwestern margin of the North China Craton: Implications for provenance and tectonic evolution. *Gondwana Res*, 88: 250–267
- Liao X D, Sun S, Chi H Z, Jia D Y, Nan Z Y, Zhou W N. 2019. The Late Permian highly fractionated I-type granites from Sishijia pluton in southeastern Inner Mongolia, North China: A post-collisional magmatism record and its implication for the closure of Paleo-Asian Ocean. *Lithos*, 328–329: 262–275
- Lin L N, Xiao W J, Wan B F, Windley B F, Ao S J, Han C M, Feng J Y, Zhang J E, Zhang Z Y. 2014. Geochronologic and geochemical evidence for persistence of south-dipping subduction to late Permian time, Langshan area, Inner Mongolia (China): Significance for termination of accretionary orogenesis in the southern Altaids. *Am J Sci*, 314: 679–703
- Liu C, Du Y S, Jarochovska E, Yan J X, Munnecke A, Lu G. 2018. A major anomaly in the carbon cycle during the late Cisuralian (Permian): Timing, underlying triggers and implications. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 491: 112–122
- Liu F, Zhu H C, Ouyang S. 2011. Taxonomy and biostratigraphy of Pennsylvanian to Late Permian megaspores from Shanxi, North

- China. *Rev Palaeobot Palynol*, 165: 135–153
- Liu F, Zhu H C, Ouyang S. 2015. Late Pennsylvanian to Wuchiapingian palynostratigraphy of the Baode section in the Ordos Basin, North China. *J Asian Earth Sci*, 111: 528–552
- Liu G H. 1990. Permo-Carboniferous paleogeography and coal accumulation and their tectonic control in the North and South China continental plates. *Int J Coal Geol*, 16: 73–117
- Liu G H, Ricken W, Mosbrugger V, Kullmann J. 1998. Permo-Carboniferous carbonate-coal sequences and their stacking patterns in the North China block. *Proc R Soc Victoria*, 110: 369–384
- Liu J. 2020. *Taoheodon baizhijuni*, gen. et sp. nov. (Anomodontia, Dicynodontioidea), from the upper Permian Sunjiagou Formation of China and its implications. *J Vertebrate Paleontology*, 40: e1762088
- Liu J. 2021. The tetrapod fauna of the upper Permian Naobaogou Formation of China: 6. *Turfanodon jiufengensis* sp. nov. (Dicynodontia). *Peer J*, 9: E10854
- Liu J, Xu L, Jia S M, Pu H Y, Liu X L. 2014a. The Jiuyuan tetrapod fauna of the Upper Permian of China-2. stratigraphy, taxonomical review, and correlation. *Vertebr Palasiat*, 52: 328–339
- Liu J, Zhao Y, Liu A K, Zhang S H, Yang Z Y, Zhuo S G. 2014b. Origin of Late Palaeozoic bauxites in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and *in situ* Hf isotopes. *J Geol Soc*, 171: 695–707
- Liu J, Abdala F. 2017. The tetrapod fauna of the upper Permian Naobaogou Formation of China: 1. *Shiguaignathus wangi* gen. et sp. nov., the first akidnognathid therocephalian from China. *PeerJ*, 5: e4150
- Liu J, Yi J, Chen J Y. 2020. Constraining assembly time of some blocks on eastern margin of Pangea using Permo-Triassic non-marine tetrapod records. *Earth-Sci Rev*, 207: 103215
- Liu Q, Zhao G C, Han Y G, Eizenhöfer P R, Zhu Y L, Hou W Z, Zhang X R. 2017a. Timing of the final closure of the Paleo-Asian Ocean in the Alxa Terrane: Constraints from geochronology and geochemistry of Late Carboniferous to Permian gabbros and diorites. *Lithos*, 274–275: 19–30
- Liu Q, Zhao G C, Han Y G, Eizenhöfer P R, Zhu Y L, Hou W Z, Zhang X R, Wang B. 2017b. Geochronology and geochemistry of Permian to Early Triassic granitoids in the Alxa Terrane: Constraints on the final closure of the Paleo-Asian Ocean. *Lithosphere*, 9: 665–680
- Lu J, Zhang P X, Yang M F, Shao L Y, Hilton J. 2020. Continental records of organic carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$), weathering, paleoclimate and wildfire linked to the end-Permian mass extinction. *Chem Geol*, 558: 119764
- Lucas S G, Shen S Z. 2018. The Permian timescale: An introduction. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 450: 1–19
- Ma S X, Meng Q R, Duan L, Wu G L. 2014. Reconstructing Late Paleozoic exhumation history of the Inner Mongolia Highland along the northern edge of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 87: 89–101
- Marchetti L, Forte G, Kustatscher E, DiMichele W A, Lucas S G, Roghi G, Juncal M A, Hartkopf-Fröder C, Krainer K, Morelli C, Ronchi A. 2022. The Artinskian Warming Event: An Euramerican change in climate and the terrestrial biota during the early Permian. *Earth-Sci Rev*, 226: 103922
- Menning M, Jin Y G. 1998. Comment on ‘Permo-Triassic magnetostratigraphy in China: The type section near Taiyuan, Shanxi Province, North China’ by B.J.J. Embleton, M.W. McElhinny, X. Ma, Z. Zhang and Z.X. Li. *Geophys J Int*, 133: 213–216
- Miller K G, Kominz M A, Browning J V, Wright J D, Mountain G S, Katz M E, Sugarman P J, Cramer B S, Christie-Blick N, Pekar S F. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310: 1293–1298
- Montañez I P, Poulsen C J. 2013. The Late Paleozoic Ice Age: An evolving paradigm. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 41: 629–656
- Montañez I P, Tabor N J, Niemeier D, DiMichele W A, Frank T D, Fielding C R, Isbell J L, Birgenheier L P, Rygel M C. 2007. CO₂-forced climate and vegetation instability during Late Paleozoic deglaciation. *Science*, 315: 87–91
- Nakazawa T, Ueno K. 2009. Carboniferous-Permian long-term sea-level change inferred from Panthalassan oceanic atoll stratigraphy. *Palaeoworld*, 18: 162–168
- Niu Y Z, Shi G R, Wang J Q, Liu C, Zhou J L, Lu J C, Song B, Xu W. 2021. The closing of the southern branch of the Paleo-Asian Ocean: Constraints from sedimentary records in the southern Beishan Region of the Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Mar Pet Geol*, 124: 104791
- Nordt L, Tubbs J, Dworkin S. 2016. Stable carbon isotope record of terrestrial organic materials for the last 450 Ma yr. *Earth-Sci Rev*, 159: 103–117
- Norin E. 1922. The late Palaeozoic and early Mesozoic sediments of central Shansi. *Bull Geol Sur China*, (4): 1–79
- Norin E. 1924. The lithological character of the Permian sediments of the Angara Series in Central Shansi, N. China. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 46: 19–55
- Parrish J T. 1993. Climate of the Supercontinent Pangea. *J Geol*, 101: 215–233
- Peters-Kottig W, Strauss H, Kerp H. 2006. The land plant $\delta^{13}\text{C}$ record and plant evolution in the Late Palaeozoic. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 240: 237–252
- Phillips T L, Peppers R A. 1984. Changing patterns of Pennsylvanian coal-swamp vegetation and implications of climatic control on coal occurrence. *Int J Coal Geol*, 3: 205–255

- Poulsen C J, Pollard D, Montañez I P, Rowley D. 2007. Late Paleozoic tropical climate response to Gondwanan deglaciation. *Geology*, 35: 771–774
- Rees P M A, Gibbs M T, Ziegler A M, Kutzbach J E, Behling P J. 1999. Permian climates: Evaluating model predictions using global paleobotanical data. *Geology*, 27: 891–894
- Rees P M A, Ziegler A M, Gibbs M T, Kutzbach J E, Behling P J, Rowley D B. 2002. Permian phytogeographic patterns and climate data/model comparisons. *J Geol*, 110: 1–31
- Rhodes F H T. 1963. Conodonts from the topmost Tensleep sandstone of the eastern Big Horn Mountains, Wyoming. *J Paleont*, 37: 401–408
- Richthofen F V. 1882. China, Ergebnisse Eigener Reisen und drauf Gegründeter Studien, I-XXIV (in German). Berlin: Verlag von Dietrich Reimer. 1–792
- Richey J D, Montañez I P, Goddérís Y, Looy C V, Griffis N P, DiMichele W A. 2020. Influence of temporally varying weatherability on CO₂-climate coupling and ecosystem change in the late Paleozoic. *Clim Past*, 16: 1759–1775
- Roscher M, Schneider J W. 2006. Permo-Carboniferous climate: Early Pennsylvanian to Late Permian climate development of central Europe in a regional and global context. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 265: 95–136
- Schmitz M D, Davydov V I. 2012. Quantitative radiometric and biostratigraphic calibration of the Pennsylvanian-Early Permian (Cisuralian) time scale and pan-Euramerican chronostratigraphic correlation. *GSA Bull*, 124: 549–577
- Schmitz M D, Pfefferkorn H W, Shen S Z, Wang J. 2021. A volcanic tuff near the Carboniferous-Permian boundary, Taiyuan Formation, North China: Radioisotopic dating and global correlation. *Rev Palaeobot Palynol*, 294: 104244
- Schneebeil-Hermann E, Kurschner W M, Hochuli P A, Ware D, Weissert H, Bernasconi S M, Roohi G, ur-Rehman K, Goudemand N, Bucher H. 2013. Evidence for atmospheric carbon injection during the end-Permian extinction. *Geology*, 41: 579–582
- Scholze F, Golubev V K, Niedźwiedzki G, Sennikov A G, Schneider J W, Silantiev V V. 2015. Early Triassic Conchostracans (Crustacea: Branchiopoda) from the terrestrial Permian-Triassic boundary sections in the Moscow syncline. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 429: 22–40
- Scotese C R. 2016. PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program. Secondary PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program, <http://www.earthbyte.org/paleomap-paleoatlas-for-gplates/>
- Şengör A M C, Natal'in B A. 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 24: 263–337
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Shao L Y, Wang X T, Wang D D, Li M, Wang S, Li Y J, Shao K, Zhang C, Gao C X, Dong D X, Cheng A G, Lu J, Ji C W, Gao D. 2020. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation regularity of major coal-accumulating periods in China. *Int J Coal Sci Technol*, 7: 240–262
- Shellnutt J G. 2018. The Panjal Traps. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 463: 59–86
- Shen S Z, Xie J F, Zhang H, Shi G R. 2009. Roadian-Wordian (Guadalupian, Middle Permian) global palaeobiogeography of brachiopods. *Glob Planet Change*, 65: 166–181
- Shen S Z, Qiao L, Zhang Y C, Sun Y L, Jin Y G. 2017. Carboniferous brachiopod genera on type species of China. In: Rong J Y, Jin Y G, Shen S Z, Zhan R B, eds. *Phanerozoic Brachiopod Genera of China*, Volume 2. Beijing: Science Press. 559–649
- Shen S Z, Ramezani J, Chen J, Cao C Q, Erwin D H, Zhang H, Xiang L, Schoepfer S D, Henderson C M, Zheng Q F, Bowring S A, Wang Y, Li X H, Wang X D, Yuan D X, Zhang Y C, Mu L, Wang J, Wu Y S. 2019. A sudden end-Permian mass extinction in South China. *GSA Bull*, 131: 205–223
- Shen S Z, Zhang H, Shang Q H, Li W Z. 2006. Permian stratigraphy and correlation of Northeast China: A review. *J Asian Earth Sci*, 26: 304–326
- Sheng J Z, Jin Y G. 1994. Correlation of Permian deposits in China. *Palaeoworld*, 4: 14–113
- Shi G R, Archbold N W, Zhan L P. 1995. Distribution and characteristics of mixed (transitional) mid-Permian (Late Artinskian-Ufimian) marine faunas in Asia and their palaeogeographical implications. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 114: 241–271
- Shi G R. 2006. The marine Permian of East and Northeast Asia: An overview of biostratigraphy, palaeobiogeography and palaeogeographical implications. *J Asian Earth Sci*, 26: 175–206
- Shi X Q, Wang T, Zhang L, Castro A, Xiao X C, Tong Y, Zhang J J, Guo L, Yang Q D. 2014. Timing, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic gabbro-granodiorite-granite intrusions in the Shalazhashan of northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 208–209: 158–177
- Smith R M H. 2020. Tetrapod biozonation of the Karoo Supergroup. *South Afr J Geol*, 123: 129–130
- Snedden J W, Liu C. 2010. A compilation of Phanerozoic sea-level change, coastal onlaps and recommended sequence designations. *AAPG Bull*, 40594: 3

- Stevens L G, Hilton J, Bond D P G, Glasspool I J, Jardine P E. 2011. Radiation and extinction patterns in Permian floras from North China as indicators for environmental and climate change. *J Geol Soc*, 168: 607–619
- Sun J P, Yang L, Dong Y P, Yang X Y, Peng Y, Zhao J. 2020. Permian tectonic evolution of the southwestern Ordos Basin, North China: Integrating constraints from sandstone petrology and detrital zircon geochronology. *Geol J*, 55: 8068–8091
- Sun Y D, Liu X T, Yan J X, Li B, Chen B, Bond D P G, Joachimski M M, Wignall P B, Wang X, Lai X L. 2017. Permian (Artinskian to Wuchapingian) conodont biostratigraphy in the Tieqiao section, Laibin area, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 465: 42–63
- Sweet D E, Soreghan G S. 2012. Estimating magnitudes of relative sea-level change in a coarse-grained fan delta system: Implications for Pennsylvanian glacioeustasy. *Geology*, 40: 979–982
- Tabor N J, Poulsen C J. 2008. Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian-Early Permian tropical palaeolatitudes: A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiological climate factors. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 268: 293–310
- Tian R S, Xie G A, Zhu W B, Zhang J, Gao S, Zhang B H, Zhao H, Li T. 2020. Late Paleozoic tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean in the Northern Alxa Block (NW China). *Tectonics*, 39: e06359
- Torsvik T H, Smethurst M A, Burke K, Steinberger B. 2008. Long term stability in deep mantle structure: Evidence from the ~300 Ma Skagerrak-Centered Large Igneous Province (the SCLIP). *Earth Planet Sci Lett*, 267: 444–452
- van der Meer D G, van den Berg van Saparoea A P H, van Hinsbergen D J J, van de Weg R M B, Godderis Y, Le Hir G, Donnadieu Y. 2017. Reconstructing first-order changes in sea level during the Phanerozoic and Neoproterozoic using strontium isotopes. *Gondwana Res*, 44: 22–34
- Vérard C, Hochard C, Baumgartner P O, Stampfli G M, Liu M. 2015. 3D palaeogeographic reconstructions of the Phanerozoic versus sea-level and Sr-ratio variations. *J Palaeogeogr*, 4: 64–84
- Wang J. 2010. Late Paleozoic macrofloral assemblages from Weibei Coalfield, with reference to vegetational change through the Late Paleozoic Ice-age in the North China Block. *Int J Coal Geol*, 83: 292–317
- Wang J, Pfeifferkorn H W. 2013. The Carboniferous-Permian transition on the North China microcontinent—Oceanic climate in the tropics. *Int J Coal Geol*, 119: 106–113
- Wang M, Zhong Y T, He B, Denyszyn S W, Wang J, Xu Y G. 2020. Geochronology and geochemistry of the fossil-flora-bearing Wuda Tuff in North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 364-365: 105485
- Wang Q F, Deng J, Liu X F, Zhao R, Cai S H. 2016. Provenance of Late Carboniferous bauxite deposits in the North China Craton: New constraints on marginal arc construction and accretion processes. *Gondwana Res*, 38: 86–98
- Wang T, Tong Y, Xiao W J, Guo L, Windley B F, Donskaya T, Li S, Tserendash N, Zhang J J. 2021. Rollback, scissor-like closure of the Mongol-Okhotsk Ocean and formation of an orocline: Magmatic migration based on a large archive of age data. *Natl Sci Rev*, 9: nwab210
- Wang Y, Zhou L Y, Zhao L J, Ji M, Gao H L. 2010. Palaeozoic uplands and unconformity in the North China Block: Constraints from zircon LA-ICP-MS dating and geochemical analysis of Bauxite. *Terra Nova*, 22: 264–273
- Wang Y, Zhou L Y, Liu S F, Li J Y, Yang T N. 2018. Post-cratonization deformation processes and tectonic evolution of the North China Craton. *Earth-Sci Rev*, 177: 320–365
- Wang Y D, Yang S L, Zhang S H, Huang X F, Sun M M, Ding Z L. 2022. Early-middle Permian drying in the North China Block induced by large igneous provinces. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 592: 110922
- Wang Y P, Yang W T, Zheng D S, Zuo P F, Qi S S. 2019. Detrital zircon U-Pb ages from the Middle to Late Permian strata of the Yiyang area, southern North China Craton: Implications for the Mianlue oceanic crust subduction. *Geol J*, 54: 3527–3541
- Wang Z Q. 1993. Evolutionary ecosystem of Permian-Triassic redbeds in North China: A historical record of global desertification. In: Lucas S G, Morales M, eds. The Nonmarine Triassic. New Mexico: New Mexico Nat Hist Sci Bull. 471–476
- Wang Z Q, Chen A S. 2001. Traces of arborescent lycopsids and dieback of the forest vegetation in relation to the terminal Permian mass extinction in North China. *Rev Palaeobot Palynol*, 117: 217–243
- Willis B, Blackwelder E. 1907. Research in China. Washington: Press of Gibson Brothers
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Wu Q, Ramezani J, Zhang H, Wang T T, Yuan D X, Mu L, Zhang Y C, Li X H, Shen S Z. 2017. Calibrating the Guadalupian Series (Middle Permian) of South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 466: 361–372
- Wu Q, Ramezani J, Zhang H, Wang J, Zeng F G, Zhang Y C, Liu F, Chen J, Cai Y F, Hou Z S, Liu C, Yang W, Henderson C M, Shen S Z. 2021. High-precision U-Pb age constraints on the Permian floral turnovers, paleoclimate change, and tectonics of the North China

- block. *Geology*, 49: 677–681
- Wu Y Y, Tong J N, Algeo T J, Chu D L, Cui Y, Song H Y, Shu W C, Du Y. 2020. Organic carbon isotopes in terrestrial Permian-Triassic boundary sections of North China: Implications for global carbon cycle perturbations. *GSA Bull*, 132: 1106–1118
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, Li J L, Huang B C, Han C M, Yuan C, Sun M, Chen H L. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 477–507
- Xiong C H, Wang J S, Huang P, Cascales-Miñana B, Cleal C J, Benton M J, Xue J Z. 2021. Plant resilience and extinctions through the Permian to Middle Triassic on the North China Block: A multilevel diversity analysis of macrofossil records. *Earth-Sci Rev*, 223: 103846
- Xu Z J, Hamilton S K, Rodrigues S, Baublys K A, Esterle J S, Liu Q F, Golding S D. 2020. Palaeoenvironment and palaeoclimate during the late Carboniferous-early Permian in northern China from carbon and nitrogen isotopes of coals. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 539: 109490
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, Wilde S A, Xie L W, Liu X M. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth Planet Sci Lett*, 246: 336–352
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, Feng B, Yan J X. 2014. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records. *Geology*, 42: 835–838
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, Li W Q, Yan J X. 2016. Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices. *GSA Bull*, 128: 739–751
- Yang J H, Cawood P A, Montañez I P, Condon D J, Du Y S, Yan J X, Yan S Q, Yuan D X. 2020. Enhanced continental weathering and large igneous province induced climate warming at the Permo-Carboniferous transition. *Earth Planet Sci Lett*, 534: 116074
- Yang S F, Chen H L, Li Z L, Li Y Q, Yu X. 2018. The Early Permian Tarim Large Igneous Province in Northwest China. Elsevier. 1–196
- Yang W, Feng Q, Liu Y Q, Tabor N J, Miggins D, Crowley J L, Lin J Y, Thomas S. 2010. Depositional environments and cyclo- and chronostratigraphy of uppermost Carboniferous-Lower Triassic fluvial-lacustrine deposits, southern Bogda Mountains, NW China—A terrestrial paleoclimatic record of mid-latitude NE Pangea. *Glob Planet Change*, 73: 15–113
- Yang W, Wan M L, Crowley J L, Wang J, Luo X R, Angielczyk K D, Gastaldo R, Geissman J, Liu F, Roopnarine P, Sidor C A. 2021. Paleoenvironmental and paleoclimatic evolution and cyclo- and chrono-stratigraphy of upper Permian-Lower Triassic fluvial-lacustrine deposits in Bogda Mountains, NW China—Implications for diachronous plant evolution across the Permian-Triassic boundary. *Earth-Sci Rev*, 222: 103741
- Yang Z, Zou C N. 2019. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation and prospects of source rock oil and gas. *Pet Explor Dev*, 46: 181–193
- Yi J, Liu J. 2020. Pareiasaur and dicynodont fossils from upper Permian of Shouyan, Shanxi, China. *Vertebr Palasiat*, 58: 16–23
- Zhang H, Cao C Q, Liu X L, Mu L, Zheng Q F, Liu F, Xiang L, Liu L J, Shen S Z. 2016. The terrestrial end-Permian mass extinction in South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 448: 108–124
- Zhang H D, Liu J C, Yang J K, Ge J K, Wang J Y, Li Z. 2020. Testing final closure time of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker suture by a transition of compressional and extensional setting. *Geosci Front*, 11: 1935–1951
- Zhang H, Shen G L, He Z L. 1999. A carbon isotopic stratigraphic pattern of the Late Palaeozoic coals in the North China Platform and its palaeoclimatic implications. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 73: 111–119
- Zhang K J. 1997. North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270: 145–156
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Yang Y H. 2007a. Zircon SHRIMP U-Pb and in-situ Lu-Hf isotope analyses of a tuff from Western Beijing: Evidence for missing Late Paleozoic arc volcano eruptions at the northern margin of the North China block. *Gondwana Res*, 12: 157–165
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Yang Z Y, Hu J M, Wu H. 2007b. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Palaeozoic active continental margin. *J Geol Soc*, 164: 451–463
- Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, Liu X M, Xie L W, Chen F K. 2009. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 98: 1441–1467
- Zhang Y C, Wang Y. 2018. Permian fusuline biostratigraphy. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 450: 253–288
- Zhao G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton. *Geol Mag*, 138: 87–91
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. *Earth-Sci Rev*, 186: 262–286
- Zhong R. 1996. Late Carboniferous-Early Permian volcanic event deposits and stratigraphic correlation in Shandong Province and its

- adjacent regions. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 11: 380–394, 453
- Zhou H, Zhao G C, Li J H, Han Y G, Yao J L, Wang B. 2019. Magmatic evidence for middle-late Permian tectonic evolution on the northern margin of the North China Craton. *Lithos*, 336–337: 125–142
- Zhou R, Liu D N, Zhou A C, Zou Y. 2017. Provenance analyses of early Mesozoic sediments in the Ningwu basin: Implications for the tectonic-palaeogeographic evolution of the northcentral North China Craton. *Int Geol Rev*, 61: 86–108
- Zhou R, Liu D N, Zhou A C, Zou Y, Xie J Q. 2019. A synthesis of late Paleozoic and early Mesozoic sedimentary provenances and constraints on the tectonic evolution of the northern North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 185: 1–17
- Zhu J B, Ren J S. 2017. Carboniferous-Permian stratigraphy and sedimentary environment of southeastern Inner Mongolia, China: Constraints on final closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 91: 832–856
- Zhu X Q, Zhu W B, Ge R F, Wang X. 2014. Late Paleozoic provenance shift in the south-central North China Craton: Implications for tectonic evolution and crustal growth. *Gondwana Res*, 25: 383–400
- Zhu Z C, Liu Y Q, Kuang H W, Benton M J, Newell A J, Xu H, An W, Ji S A, Xu S C, Peng N, Zhai Q G. 2019. Altered fluvial patterns in North China indicate rapid climate change linked to the Permian-Triassic mass extinction. *Sci Rep*, 9: 16818
- Ziegler A, Eshel G, Rees P M A, Rothfus T, Rowley D, Sunderlin D. 2003. Tracing the tropics across land and sea: Permian to present. *Lethaia*, 36: 227–254
- Zou C N, Yang Z, Huang S P, Ma F, Sun Q P, Li F H, Pan S Q, Tian W G. 2019. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas. *Pet Explor Dev*, 46: 451–462

(责任编辑: 朱茂炎)