

doi: 10.13745/j.esf.2014.02.015

华北北部土城子组时代及中国陆相侏罗-白垩系界线探讨

许欢, 柳永清*, 旷红伟, 彭楠

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

XU Huan, LIU Yongqing*, KUANG Hongwei, PENG Nan

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

XU Huan, LIU Yongqing, KUANG Hongwei, et al. Ages of the Tuchengzi Formation in northern China and the terrestrial Jurassic-Cretaceous boundary in China. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(2): 203-215

Abstract: We here briefly introduce the distribution, sedimentary characteristics and filling sequence of the Tuchengzi Formation in northern North China. On the basis of the uncertainty of the age of the Tuchengzi Formation, we analyzed all the isotopic dating data and constrained the age of Tuchengzi Formation to be 154-137 Ma. Previous biostratigraphy research is consistent with the age of Tuchengzi Formation. The International Commission on Stratigraphy (ICS) proposed 145 Ma to be the age of Jurassic-Cretaceous boundary in 2013, which is supported by recent studies in the Tethys-Himalaya and Andes, although more high-precision geochronology is still needed for the final establishment. This boundary age suggests that the Tuchengzi Formation is the Late Jurassic-Early Cretaceous in age, and the terrestrial Jurassic-Cretaceous boundary in China exists in the Tuchengzi Formation. The international stratigraphic boundary, especially for the J/K boundary, should be established by the marine biostratigraphy. The establishment of the J/K boundary in China should give priority to obey the symbol and achievement derived from the marine biostratigraphy and organic evolution.

Key words: Tuchengzi Formation; geochronology; Jurassic-Cretaceous boundary; biostratigraphy

摘要:文中简要介绍了华北北部土城子组区域分布、沉积特征和垂向充填序列。针对目前土城子组时代不定的现状,结合近些年来已发表的土城子组的同位素年代学数据,将土城子组年龄限定在 154~137 Ma。以往对土城子组进行的相关生物地层研究成果与土城子组时代一致。国际地层委员会(ICS)2013 年提出将 145 Ma 定为侏罗-白垩系界线年龄,这得到了特提斯喜马拉雅和安第斯地区最新侏罗-白垩系界线研究成果的支持,虽然最终确定这一界线还需更多高精度年代学的研究。再结合土城子组同位素年龄,提出土城子组时代为晚侏罗世—早白垩世,中国陆相侏罗-白垩系界线存在于土城子组内部。国际地层界线及对比,特别是国际 J/K 界线应通过研究海相生物地层来完成,中国陆相 J/K 界线的确立应优先服从海相地层及其生物演化所划分的标志与结果。

关键词:土城子组;同位素年代;侏罗-白垩系界线;生物地层

中图分类号:P534.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2014)02-0203-13

晚中生代,中国东北部进入陆内演化阶段,发育一系列裂谷盆地,火山活动频繁^[1-4]。土城子组作为这一时期重要的盆地充填建造,主要分布在华北北缘阴山-燕山地区,为一套炎热、干旱气候条件下形

成的典型陆相红层^[5]。古亚洲洋闭合之后,整个中国北方逐渐抬升,特别是在中国东北部,形成了盆地高地的古地理格局。在这些高山盆地中发育有两个晚中生代重要的生物群,即中-晚侏罗世燕辽生物群

收稿日期:2013-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(90914003,41372109,41272021);中国地质调查局项目(12120113096500)

作者简介:许欢(1987—),男,博士研究生,沉积地质与盆地分析研究方向。E-mail:xuhuan0816@126.com

*通讯作者简介:柳永清(1960—),男,研究员,沉积地质学与地层学专业。E-mail:liuyongqing@cags.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2014,21(2)

和早白垩世热河生物群,且二者在晚侏罗世—早白垩世发生演替^[6]。

近 20 年来,在冀北、辽西以及内蒙古东南部早白垩世地层中发现大量保存完好的热河生物群化石,包括原始鸟类、带毛恐龙、哺乳动物、翼龙、两栖类、鱼、昆虫以及被子植物^[7-12]。相比之下,外界对同一地区发育的中-晚侏罗世燕辽生物群却关注甚少,然而其中就发育有已知最原始的带毛恐龙^[13],会游泳和飞行的哺乳动物^[14-15],带“毛”翼龙以及大量蜥蜴、鱼类和昆虫。最新年代学研究表明,带毛恐龙出现的时间要远早于 161 Ma^[16]。在早白垩世最早期热河生物群出现之前,燕辽生物群中 90% 以上生物已消亡^[17]。研究表明,燕辽生物群和热河生物群的过渡时间正好与土城子组形成时间相一致。因此,土城子组时代的厘定对于生物群演化研究具有重要意义。

经过几十年的研究,学术界逐渐意识到土城子组在华北中生代地层、区域构造和演化上的重要意义^[5,18-25],但目前对于土城子组形成构造环境还存在很大争议,主要存在挤压^[18-22,26]、区域性伸展^[5,25,27-28]和挤压向伸展转换^[29-31]3 种观点,这些不同的解释都与土城子组年代的不确定存在密切关系。

虽然近些年来在土城子组火山岩夹层中获得了

大量高精度锆石年龄,但其形成时代一直没有最终确定。早期和政军等^[18-19]根据土城子组上下地层的 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄将其限定在 156~145 Ma。随后 Davis 等^[24]结合前人锆石 U-Pb 年代学数据,将土城子组时间定在 156~139 Ma。Xu 等^[32]通过土城子组底部和顶部两个高精度年代学数据,将土城子组时代厘定为 154~137 Ma。最近,王思恩等^[33]依据冀北-辽西地区土城子组各门类化石和同位素年代学进行了对比研究认为,土城子组生物地层年代为晚侏罗世早—中期 (Oxfordian-Kimmeridgian),对应同位素年代 143~137 Ma。因此,鉴于上述情况,本文认为很有必要对土城子组时代进行一次系统的梳理,特别是近年来已发表的同位素年代学数据,结合国际 J/K 界线最新研究成果,对土城子组形成时代进行厘定,为以上亟待解决的科学问题提供有利的年代学支撑。

1 地质背景

中生代以后,华北北部转为陆相环境,侏罗、白垩系在华北北缘以及东北地区分布广泛,主要发育一套火山-沉积岩系(图 1)。燕山地区侏罗、白垩纪

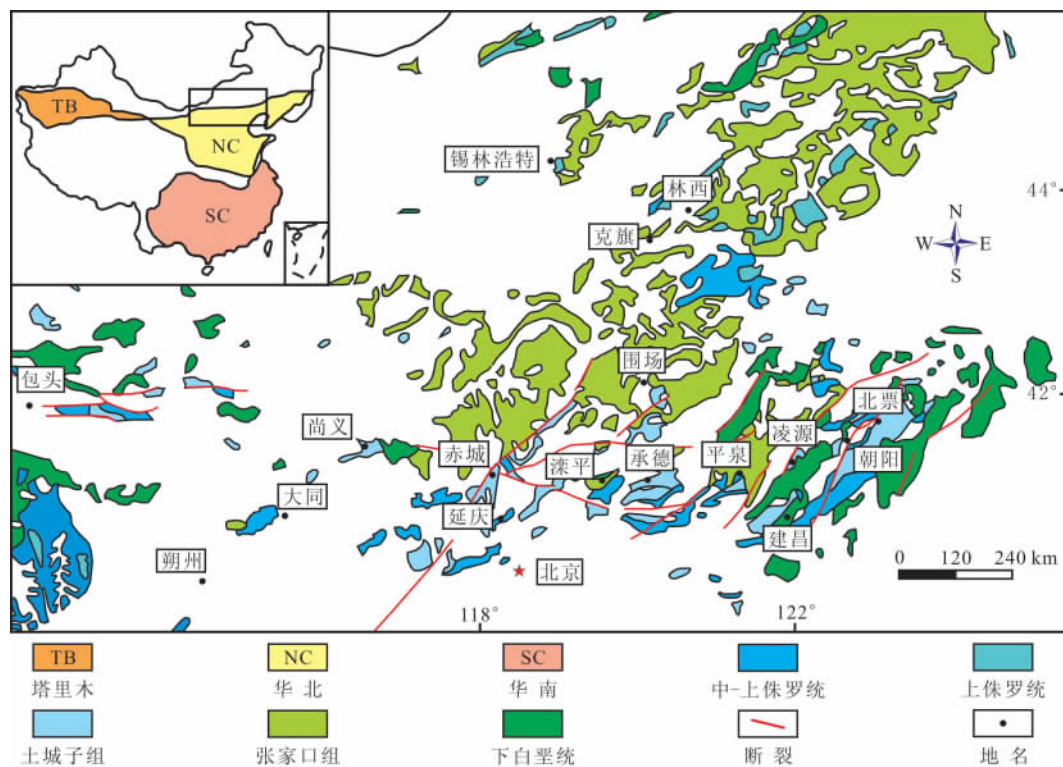


图 1 华北北部土城子组分布及晚中生代区域地质简图

Fig. 1 Regional distribution of Tuchengzi Formation and Late Mesozoic geology in northern China

演化可分为三个大的火山-沉积旋回,早期以南大岭组-下花园组中基性火山岩和煤系沉积为代表,中期为髫髻山组-土城子组中酸性火山岩和粗碎屑沉积,晚期以义县组-九佛堂组中基性火山岩和湖相沉积为主,其中中-晚侏罗世九龙山组和髫髻山组中发育燕辽生物群,早白垩世义县组和九佛堂组中发育热河生物群。燕山西部和阴山-大青山地区火山活动微弱,其中尚义地区仅发育下花园组煤系、龙门山组和土城子组粗碎屑,缺失大部分地层,阴山-大青山地区只在早白垩世白女羊盘组中发育火山岩,其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 115 Ma^[34]。中侏罗世,燕山运动爆发,发育以龙门组-九龙山组为代表的巨、粗砾岩堆积,东部构造活动强于西部。华北北部大部分地区在早白垩世早期发生地层缺失,造成区域性角度不整合,仅在冀北地层发育连续(图 2)。

土城子组主要分布在华北北缘阴山-燕山地区,冀北称为后城组,大青山地区称为大青山组,以稳定的区域性分布和可对比的紫红色粗碎屑组分为特征,在不同地区其垂向充填序列存在差异(图 3)。土城子组沉积厚度较大,如辽西金羊盆地最大厚度

2 000 m 左右,冀北新城子盆地厚达 2 150 m,大青山包头和呼和浩特地区沉积厚度都超过 4 400 m。燕山地区土城子组中普遍发育中酸性火山岩,而阴山-大青山地区则相对缺乏。

大青山地区土城子组/大青山组可分为两个大的沉积旋回:第一旋回底部发育冲积扇相砾岩,主体由河流相砂砾岩逐渐过渡为三角洲、湖泊相粉砂岩、砂岩及少量淡水灰岩,钙质结核发育;第二旋回下部为冲积扇相砾岩、砂砾岩,上部为辫状河相砂岩夹砾岩。燕山西部尚义地区土城子组/后城组下部以砾岩为主,夹灰紫色安山岩、英安岩,盆地北部砾岩厚度较大,其中可见粒径超过 2 m 巨砾,向上逐渐过渡为河流相、三角洲相、湖相砂岩、粉砂岩、泥岩,钙质结核、泥裂发育,在近顶部位置发育有风成砂岩。延庆-赤城地区土城子组充填序列相近,垂向上表现为下细上粗反韵律,下部以湖相为主,向上逐渐过渡为三角洲相、冲积扇相砾岩,其中在延庆地区土城子组下部发育厚度较大的凝灰岩、凝灰质角砾岩层。冀北中部地区土城子组下部以冲积扇相紫红色砾岩为主,中部普遍发育河流相砂岩、砾岩,东部地区则

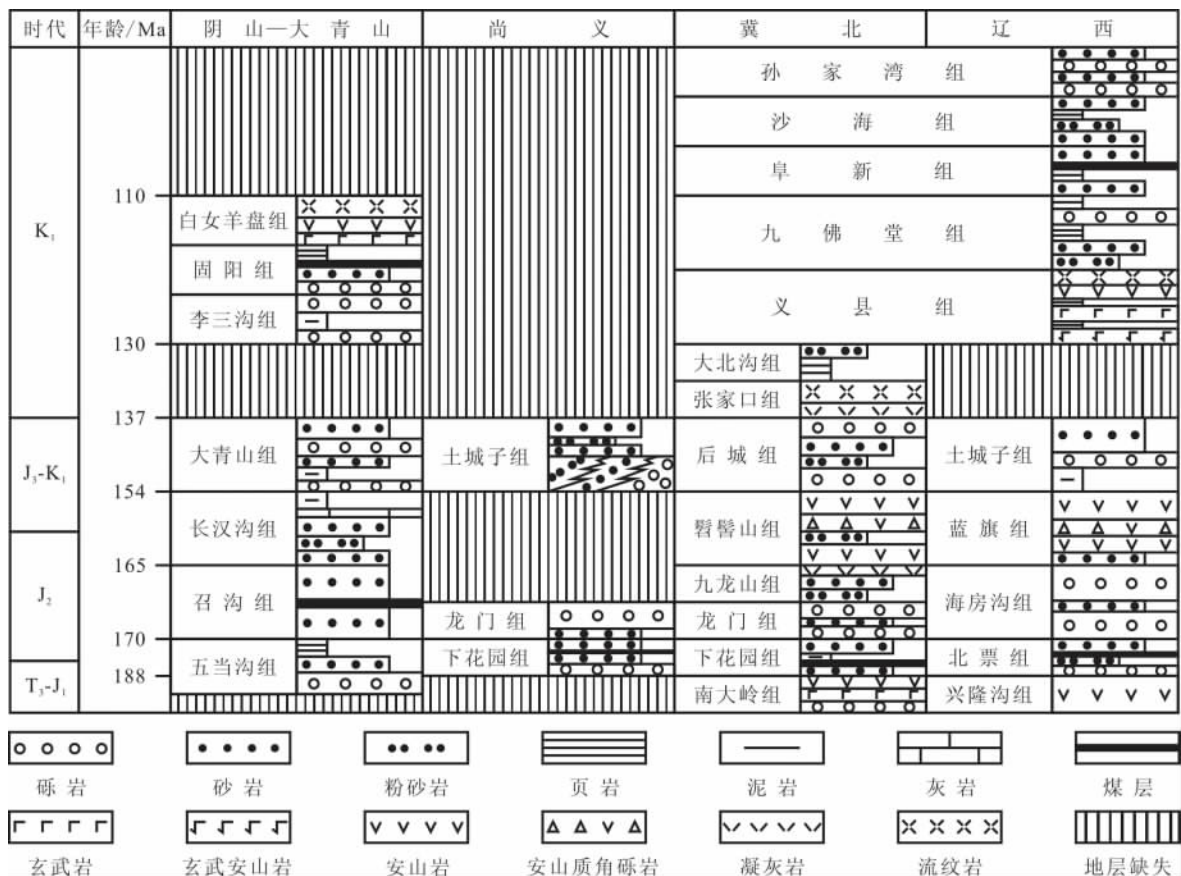


图 2 阴山-燕山地区侏罗纪-白垩纪地层序列、岩石组合和区域对比
 Fig. 2 Stratigraphic sequence, rock assemblages and regional correlation in Yinshan-Yanshan area

为湖相粉砂岩、泥岩沉积,上部整体以冲积扇相、辫状河相紫红色砾岩、砂岩为主,凝灰岩夹层较为发育。辽西地区土城子组表现为明显的三段式结构,下部为滨浅湖相红色粉砂岩、泥岩,钙质结核发育,中部以冲积扇相灰紫色砾岩为主,北票一带厚度较大,上部为滨湖、风成沉积,发育凝灰岩夹层。

从区域地层对比来看,土城子组普遍角度不整合在前中生代地层之上,在冀北-辽西地区与下伏髫髻山组/蓝旗组安山质火山岩多表现为整合或平行不整合接触关系。在冀北地区,土城子组与上覆张家口组酸性火山岩存在整合与角度不整合两种接触关系。在辽西地区,土城子组则被早白垩世义县组砾岩角度不整合覆盖(图3)。

2 土城子组同位素年代

近几十年来,同位素地质年代学得到了快速发展,从20世纪中期的U-Th-Pb法、K-Ar法和Rb-Sr法,到晚期的Ar-Ar法、Sm-Nd法、(U-Th)/He法和Re-Os法,再到21世纪的Lu-Hf法,这些都为探讨地球演化过程中的重大地质事件、古环境变化和生物群演化等提供了重要的年代学信息^[16,51-54]。由于不同的同位素测年方法各有其优缺点和适用性,所以对待目前大量的同位素年龄,应持有审慎的态度,结合地质事实等因素来综合考虑。

由于燕山地区土城子组存在有中酸性火山岩及凝灰岩夹层,因此20世纪90年代起就有研究者开始对土城子组进行同位素年代学研究,最初的方法有Rb-Sr法和K-Ar法,随后以锆石离子探针微区原位U-Pb测年法(SHRIMP)、锆石激光剥蚀法(LA-ICP-MS)以及Ar-Ar法为主。锆石U-Pb法和Ar-Ar法在测年方法以及精度上较前者高,所以给出的年龄更为可信,不过也存在与实际地质情况不符的年龄,如杨进辉等^[55]在冀北宣化庞家房土城子组上部英安岩测得的锆石U-Pb(LA-ICP-MS)年龄为 (130 ± 1) Ma,比目前所测得的土城子组最年轻年龄要年轻很多,且跨入了义县组时代,因此建议予以排除。

基于近年来土城子组大量的同位素年代数据积累,目前已基本可以将土城子组顶底界线年龄最终确定下来。张宏等^[37]在辽西北票四合屯土城子组顶部凝灰岩中获得的锆石U-Pb(LA-ICP-MS)年龄为137 Ma; Xu等^[32]对辽西朝阳土城子组顶部风成砂下部凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb定年获得137 Ma

年龄;王思恩等^[33]对辽西北票巴图营子土城子组顶部凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年代学的研究同样获得了137 Ma年龄。此外,张宏等^[36]在冀北滦平土城子组上部凝灰岩中测得的锆石U-Pb(LA-ICP-MS)年龄为136 Ma,这是目前已知土城子组最年轻年龄。同时,牛宝贵等^[56]对承德和滦平盆地土城子组之上张家口组底部凝灰岩和流纹岩锆石SHRIMP U-Pb定年也获得136 Ma的谐和年龄。

从以上土城子组4个顶界年龄数据结果来看,土城子组顶界时限应确凿无疑地置于136~137 Ma之间。此外,承德和滦平两地张家口组与土城子组分别为角度不整合和平行不整合接触,且土城子组与张家口组顶、底年龄如此接近,可以认为二者是连续过渡的,即角度不整合并未缺失较长时间。在区域上土城子组与张家口组也普遍存在整合与角度不整合接触关系,其演化特征应该与承德和滦平地区一致。因此,鉴于土城子组与张家口组之间时间间断较短,本文倾向将土城子组上限时代限定为137 Ma。

土城子组底界年龄,虽有很多学者进行研究,但仍存有争议。Cope^[23]在承德盆地土城子组底部的凝灰岩中获得锆石U-Pb年龄156 Ma,随后Davis等^[24],孙立新等^[31]等一些学者据此将土城子底界时代定在156 Ma。但Cope在2007年将其2003年承德盆地土城子组底部测得的两个年龄修正为152 Ma^[40]。Xu等^[32]对冀北围场土城子组底部凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb定年获得154 Ma的谐和年龄,这是目前区域上土城子组最老的年龄。此外,土城子组与下伏髫髻山组区域上普遍表现为整合和平行不整合的接触关系,髫髻山组顶部年龄的确也能够对土城子组底界时代起到约束作用。Davis等^[24]测得的承德盆地南翼髫髻山组顶部安山岩锆石SHRIMP U-Pb年龄为154 Ma, Cope等^[40]报道的承德盆地北翼髫髻山组顶部凝灰岩Ar-Ar年龄为153 Ma,杨蔚^[41]报道的辽西北票盆地髫髻山组顶部的安山玢岩锆石SHRIMP U-Pb年龄为154 Ma,柳永清等^[57]对内蒙古宁城道虎沟地区髫髻山组上部粗面玄武岩进行了锆石SHRIMP U-Pb定年,获得的年龄为152 Ma,刘健等^[39]测得的承德向斜南翼髫髻山组顶部晶屑凝灰岩锆石U-Pb(LA-ICP-MS)年龄为153 Ma。上述数据表明,髫髻山组顶界年龄集中在153~154 Ma之间。因此,综合考虑土城子组底部最大年龄和髫髻山组顶部年龄以及二者接触关系,本研究认为,将土城子组底界年龄确定为154 Ma是比较稳妥和可行的。

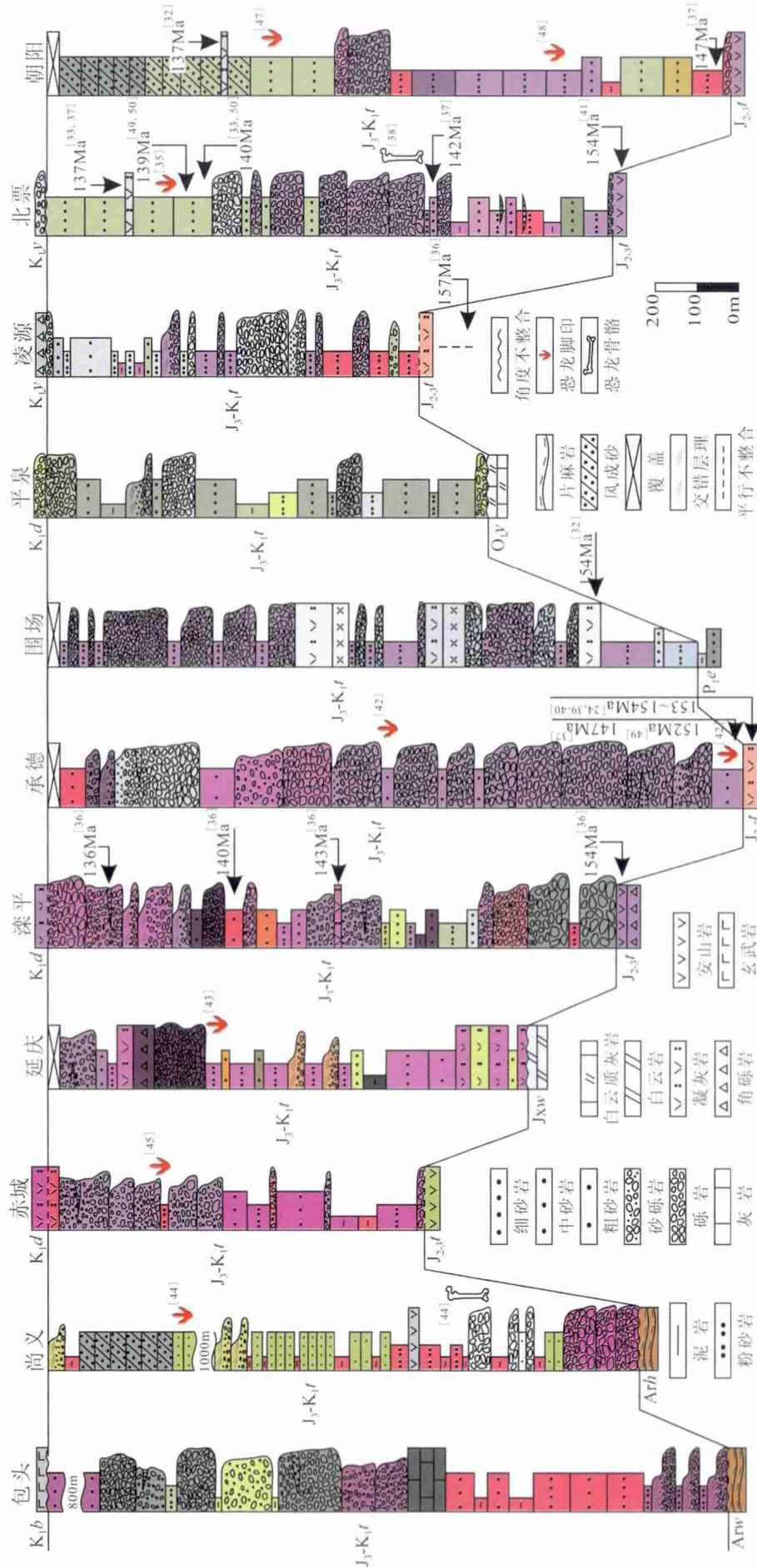


图3 华北北缘土城子组地层对比 [5,24,32-33,35-50]
 Fig. 3 Correlation of Tuchengzi Formation, northern North China [5,24,32-33,35-50]

表1 冀北-辽西地区土城子组同位素年代

Table 1 Geochronological data for Tuchengzi Formation in northern Hebei and western Liaoning

地点	样品编号	经纬度	层位	岩性	测试方法	年龄/Ma	资料来源
北票四合屯	CY05	N 41°36.267' E 120°48.387'	土城子组顶部	凝灰岩	U-Pb(LA-ICPMS)	137.2±6.7	[37]
北票四合屯	99L-T1		土城子组上部	凝灰岩	Ar-Ar	139.4±0.2	[49]
北票巴图营子	BP01	N 41°32.936' E 120°49.920'	土城子组一段顶部	凝灰岩	U-Pb(LA-ICPMS)	141.6±1.3	[37]
北票巴图营子	BJ-83	N 41°31'41" E 120°46.39'	土城子组顶部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	137.3±1	[33]
北票巴图营子	TJ-30	N 41°30'53" E 120°48.52'	土城子组下部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	139.6±1.9	[33]
北票巴图营子	TJ-22	N 41°30'56" E 120°48.35'	土城子组下部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	140.2±1.3	[33]
北票三宝营	LJT-1	N 41°33'23" E 120°49.32'	土城子组下部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	139.6±0.7	[33]
北票庙沟	TCZ07-1		土城子组上部	凝灰岩	Ar-Ar	139.0±0.5	[50]
北票庙沟	TCZ07-2		土城子组上部	凝灰岩	Ar-Ar	139.5±1.0	[50]
朝阳塔山沟	BT04	N 41°29.809' E 120°48.166'	土城子组底部	安山岩	U-Pb(LA-ICPMS)	147.4±2.2	[37]
朝阳孙家湾	100724-3	N 41°24.647' E 120°30.236'	土城子组三段	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	137.4±1.3	[32]
滦平张家沟门	328-4	N 40°48.210' E 117°12.510'	土城子组三段上部	凝灰岩	U-Pb(LA-ICPMS)	136.4±1.9	[36]
滦平张家沟门	328-3	N 40°48.554' E 117°12.742'	土城子组三段上部	凝灰岩	U-Pb(LA-ICPMS)	139.6±1.5	[36]
滦平小营	328-2	N 40°55.977' E 117°28.141'	土城子组二段底部	凝灰岩	U-Pb(LA-ICPMS)	142.6±1.3	[36]
承德	00CH707	N 40°01.475' E 118°14.854'	土城子组底部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	152.3±2.9	[40]
承德	01CH16	N 40°54.699' E 118°13.787'	土城子组底部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	151.8±3.3	[40]
承德	CD10	N 40°48.046' E 118°05.332'	土城子组底部	凝灰岩	U-Pb(LA-ICPMS)	146.5±1.7	[37]
围场	60815	N 42°01.62' E 117°40.41'	土城子组底部	凝灰岩	U-Pb(SHRIMP)	153.7±1.1	[32]
北京花山盆地			土城子组	粗安岩		144.6	[58]
宣化庞家房	FW04-123	N 40°32'47" E 114°56.03'	土城子组上部	英安岩	U-Pb(LA-ICPMS)	130±1	[55]
宣化庞家房	8		土城子组上部	玄武岩	K-Ar	144.7±2.8	[28]

值得提出的是,张宏等^[37]在承德盆地和朝阳金-羊盆地土城子组底部凝灰岩中均测得了147 Ma的锆石 U-Pb(LA-ICP-MS)年龄,这两个数据比上述本文推荐的土城子组底界年龄要年轻7 Ma,也较Cope等^[40]在承德盆地同一地区同层位获得数据年轻5 Ma。许欢等^[25]在对辽西地区土城子组碎屑锆石研究中发现,土城子组碎屑锆石年龄频谱中极为少见髻髻山组年龄,这可能表明土城子组沉积期,髻髻山组并没有给土城子组提供物源,考虑到前述髻髻山组与土城子组的接触关系,我们初步判断髻髻山组与土城子组极有可能为连续或称过渡演化关系,也即二者之间没有较长的表征地层间断意义上的时间缺失。上述这些较年轻的所谓“土城子组底部年龄”应代表的是土城子组中部年龄,实际上从前人文献中也发现这些测年样品代表的土城子组层位仅仅是中上部地层。因此,本研究综合考虑各方面因素和实测数据认为,华北北缘土城子组的同位素年代学区间为154~137 Ma,对比国际地层年表(2013),土城子组形成于晚侏罗

世中晚期(Kimmeridgian-Tithonian)—早白垩世早期(Valanginian)。

3 讨论

土城子组沉积物特征及沉积相组合代表了干旱、炎热的气候环境,特别是到了晚期,华北北部处于行星风系所控制的西风带上,沙漠发育,生态环境进一步恶化,可能不利于生物生存^[59]。但在土城子组早、中期,华北北部地区仍然生存着一定量的生物,包括叶肢介、介形虫、昆虫、双壳、恐龙类、鸟类以及植物和孢粉,其中以叶肢介和介形虫最多。

当同位素测年方法在国内兴盛以前,土城子组的时代大多都是通过古生物及其组合来确定的。(1)叶肢介方面,王五力等^[60]将冀北-辽西地区土城子组叶肢介划分为 *Pseudograptia-Beipiaoestheria-Mesolimnadia* 组合,时代定为中侏罗世 Bathonian 最晚期。王思恩等^[61-62]则将其划分出两个组合, *Pseudograptia-Sinograptia-Monilesthera* 组合和

Yanshanoleptestheria-Pingquania-Linagyuanella 组合,时代分别定为中侏罗世晚 Bathonian 期和晚侏罗世早期。(2)介形虫方面,王五力等^[60]将冀北-辽西地区土城子组介形虫划分为 *Cetacella substriata-Mantelliana alta-Darwinula bapanxiaensis* 组合和 *Djungarica yangshulingensis-Mantelliana reniformis-Stenestroemia yangshulingensis* 组合,时代定为晚侏罗世。庞其清等^[63]、杨仁泉等^[64]、王思恩和季强^[61]的研究也将其定为晚侏罗世。(3)植物方面,土城子组植物化石分布较局限,王五力等^[60]将冀北-辽西地区植物化石划分为 *Brachyphyllum expansum-Pagiophyllum beipiaoense* 组合,时代定为中侏罗世晚期—晚侏罗世,郑少林等^[65]将北票地区发现的植物化石归为中晚侏罗世。(4)孢粉方面,郑少林等^[66]和蒲荣干、吴洪章^[67]等将土城子组孢粉归入 *Quadraeculina-Classopolis* 组合,时代定为晚侏罗世早期,张望平^[68]则划分为 *Classopolis-Callialasporites-Schizaeisporites* 组合,时代定为晚侏罗世早期。(5)双壳类方面,萧宗正等^[58]、王思恩和季强^[62]都做研究,但时代偏新,与早白垩世义县组相当^[69]。(6)昆虫方面,洪友崇^[70]通过对延庆和赤城地区土城子组昆虫研究后将其定为晚侏罗世 Oxfordian-Kimmeridgian。此外,土城子组中还发现有鸟臀类杨氏朝阳龙 (*Chaoyangsaurus youngi*) 和聂氏宣化龙 (*Xuanhuasaurus niei*)^[38],且近些年来,在辽西朝阳、北票,冀北承德、赤城、尚义以及北京延庆等地均发现大量恐龙足迹化石^[35,42-43,44-45]以及部分鸟类足迹化石^[48],但这些化石的发现对于土城子组时代的限定意义不大。

从上述土城子组生物地层研究给出的地质时代和同位素年代学研究的对比不难发现,生物地层时代明显比同位素测年结果要老,这一现象在中生代地层系统中是普遍存在的。周忠和等^[71]认为,除存在化石的准确分类和对比,研究程度不等以及世界各地相关陆相地层缺少可靠的年代学数据的因素外,各门类演化的扩散速率也存在较大的不同。如,冀北-辽西地区的早白垩世热河生物群,过去的生物地层对比研究将其定为晚侏罗世或晚侏罗世—早白垩世^[72-75],但随着近些年来高精度年代学研究以及越来越多新化石材料的发现,热河生物群属早白垩世已无争议^[9,76-81]。

目前,最新的国际地层表(2013)显示,中生代还

存在 17 个阶的界线未定,特别是下侏罗统—上白垩统。由于全球侏罗系—白垩系界线沉积时期是全球持续的大海退期,全球海平面下降造成动物群和植物群的分区性或生物地理区更加显著,同时加剧欧亚大陆不同地区沉积相的分异,进而使得晚侏罗世末期和早白垩世初期生物群和地层对比更加困难^[82]。而对于陆相生物地层、岩石地层的对比则由于陆相环境巨大的差异性则难度更大,不确定性增多。因此,地层学的研究应纳入到多重地层划分和研究的体系中,只有将生物地层对比与年代地层和磁性地层等地层学分支学科相结合,才能取得更为准确的结果。

新近,王思恩等^[33]对冀北-辽西地区土城子组各门类化石(植物、孢粉、介形类、叶肢介、昆虫、脊椎动物)进行了梳理并认为土城子组各门类生物化石所指示的地层年代应属于晚侏罗世早—中期(Oxfordian-Kimmeridgian,大约 164~152 Ma)。与此同时,王思恩等^[33]还刊发了土城子组 4 个新实测年代学成果(140 Ma, 3 个数据;137 Ma),进一步丰富了土城子组年代学数据(库)。基于土城子组顶部(辽宁北票巴图营子白家窝铺剖面 83 层)新测的 137.3 Ma(原样品号 BJ-83)数据,以及土城子组上部(辽宁北票巴图营子崔杖子—361 高地剖面 22 层)140.2 Ma(原样品号 TJ-22)的新测数据,王思恩等^[33]计算了剖面 22~83 层间沉积速率(243 m/Ma),由此推断“得到了 141.7 Ma 是土城子组底界的年龄”,并据此对国际地层表(2013)侏罗系内部阶及侏罗—白垩系界线的年代提出了强烈质疑。

由上述可知,王思恩等^[33]研究和梳理土城子组各门类化石资料是充分和可信的,化石资料指出的土城子组年代学结论与本文依据同位素测年结果所建议的土城子组地质年代(Kimmeridgian-Tithonian,154~137 Ma,晚侏罗世中晚期)也是比较吻合的,并非矛盾。土城子组各门类化石材料度多集中在土城子组下部,因此,生物群面貌反映晚侏罗世的特点也是和土城子组下部同位素测年结果(晚侏罗世)一致的,尤其是介形类演化已明显表现出下部组合为晚侏罗世早期,上部组合具有早白垩世最早期色彩,虽然未见早白垩世典型分子,但总体也属于晚侏罗世中晚期—早白垩世早期特点^[33]。

然而,仅简单依据土城子组地层厚度和时间(m/Ma)的简约公式来计算它的沉积速率是不科学也是不可取的,特别是目前文献^[33]得到的土城子

组 $243 \text{ m/Ma}^{[33]}$ 的沉积速率显然太高(实际上要较之低很多),因此,通过这个速率计算得到的(22 层测年样品之下覆 400 m 厚度沉积物底)土城子组“底界”年龄为 142 Ma 是不可靠的,实际上的底界年龄也应该远老于 142 Ma。因此,文献[33]对土城子组和国际地层表(2013)侏罗系内部阶及侏罗-白垩系界线年代的质疑、讨论也就值得充分商榷了。

那么陆相生物演化及其阶段划分能否为 GSSP 做出贡献或识别、建立全球可对比的界线及其年龄,换言之,试图利用陆相生物演化阶段来改变国际 J/K 界线位置是否科学、合理或可行?对此,本文作者有如下几点意见供参考和批评:(1)众所周知,国际地层年表(及界线或断代、GSSP)及其地层对比是通过海相生物地层来完成的,如牙形类、菊石、笔石、浮游有孔虫,钙质超微等具有全球性分布的浮游动物群,部分结合了同位素地球化学(如成冰纪和特提斯域碳、氧同位素)、全球变化事件(如:D/C 界线的黑色页岩事件,海平面变化)作为辅助对比标志。正是由于上述对比标志的全球性意义和可对比性,才使得国际地层年表具有全球意义和全球可比性^[83]。(2)相对于全球特提斯域生物古地理分区都存在和已知巨大差异性,以至于难以用统一的海相生物门类或识别标志对比、划分或建立全球“通行”的地层界线或断代、GSSP 等。那么,陆相古地理、古生态环境的差异和变化是我们可以预知和想象的,实际上它已经达到并远超过我们想象或设想的程度,从而,陆相古生物及其生物古地理分区的复杂程度就更显而易见了。因此,试图应用陆相生物演化及其阶段划分 GSSP 或建立全球对比(界线),或者说利用陆相生物演化阶段来改变国际 J/K 界线位置应谨慎而慎之。但是,这并非说明陆相生物演化及其阶段划分就不能为 GSSP 或建立全球对比(界线)作贡献或为之服务,实现这样目的需通过应用海陆交互生物演化以及同位素年代学、C-O 等同位素地球化学和同位素年代学等的桥梁纽带作用,如此才能充分挖掘陆相生物演化及其阶段划分为 GSSP 或建立全球对比(界线)的潜能作用,拓宽了界线空间,可以在更大范围和环境了解 GSSP 或全球对比(界线)附近海陆环境生物组合的变化及其整合、对比,进一步丰富 GSSP 或全球对比(界线)的生物学内涵和意义。(3)陆相地层研究及其国际对比中,应严格遵守和认知岩石地层学、生物地层学、同位素年代地层学、磁性地层学的应用次序、使用前提与局限性,缺

乏高精度的岩石地层和年代地层格架下的同位素年代地层学、磁性地层学应用容易导致非科学的结论与解释。同样,陆相生物地层学及其生物演化在划分 GSSP 或建立全球对比(界线),特别是国际 J/K 界线位置和生物学涵义,需借助海陆交互的桥梁和同位素年代地层学成果,服从海相地层及其生物演化所划分的标志与结果。

多年来,国内外地层学家们一直努力尝试着陆相与海相地层的整合或对比,特别是针对侏罗-白垩系界线,但至今有关 J/K 界线的争论仍在持续。

我国白垩纪海相地层分布较为局限,仅集中在西藏、黑龙江以及台湾等地区^[84]。相比而言,白垩纪陆相地层则十分发育,以东北地区研究程度为最高。近年冀北-辽西地区的陆相侏罗-白垩系界线的研究取得了较大进展。陈丕基^[85]对中国陆相侏罗系和白垩系进行了综合研究,将侏罗-白垩系界线置于义县组和九佛堂组之间,年龄定为 125 Ma^[82]。全国地层委员会 2002 年出版的《中国区域年代地层(地质年代)表说明书》将中国陆相侏罗-白垩系界线置于大北沟组和义县组之间,以 137 Ma 作为界线年龄^[86]。滦平盆地侏罗-白垩系的综合研究成果指出,侏罗-白垩系界线应置于大北沟组与家店子组之间,界线年龄为 130 Ma^[87-90]。此外,王五力等^[91]认为侏罗-白垩系界线应该放在义县组下部尖山沟层和上部大康堡层之间,建议将 124 Ma 作为界线年龄。国际地科联和国际地层委员会曾经发布了两个不同的侏罗-白垩系界线年龄值,分别为 135 Ma(2000)^[92]和 145 Ma(2013)^[93],也反映着这一时期 J/K 界线研究的进展和动态。多年来,我国陆相侏罗-白垩系的研究似乎更倾向于将 135 Ma 作为陆相侏罗-白垩系界线年龄,而新近的研究成果又显示,接受 ICS 的侏罗-白垩系界线 145 Ma 的数据是新趋势和必然。尽管如此,包括国际 ICS 以及国际侏罗-白垩系界线工作组都面临着继续研究和发现侏罗-白垩系界线的若干科学证据。

季强等^[94]认为,国际侏罗-白垩系界线必将会选择在海相地层发育区,中国侏罗-白垩系界线问题要在国际侏罗-白垩系界线层型(GSSP)确定之后才能解决。虽然顾知微、沙金庚等在陆相地层与海相地层对比方面取得了许多进展^[95-99],但最终确立我国陆相侏罗纪-白垩纪地层界线仍面临很多挑战^[71]。国际侏罗-白垩系界线也是以生物地层资料作为对比划分标志,但由于特提斯域生物古地理分

区的差异,难以用统一的生物门类或识别标志连起来。如特提斯地区以 *Berriasella Jacobi* 菊石带作为侏罗-白垩系界线(Berriasian 底界)^[100],加拿大北方地区以双壳类 *Buchia unshensis* 与 *B. volgensis* 带的界线来识别侏罗-白垩系界线^[101],Matsuo-
ca^[102]建立了西太平洋地区侏罗纪-白垩纪放射虫带,但菊石仍是国际公认的划分标准。值得指出的是,由于在侏罗纪—白垩纪期间,Pangea 大陆发生裂解,全球古地理格局发生了重大改变^[103],菊石生物出现了明显的分区性,因此,很难用菊石来对“系”这一级别进行全球性对比^[104],如特提斯域的 *Berriasella Jacobi* 到目前为止还无法与安第斯地区的 *Argentiniceras noduliferum* 进行完全对比^[105-106]。

在侏罗-白垩系界线的年代学数据上,Ogg^[107]提出的侏罗-白垩系界线年龄 145.5 Ma 仅仅只是一个推算的年龄值,缺少真正的地层记录,虽然目前为很多人所接受,但由于缺少可靠的同位素年龄证据,仍有很多人这一界线年龄持反对意见。Mahoney 等^[108]对西北太平洋 Shatsky Rise 的 Berriasian 阶底部的玄武岩进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年,获得了(144.6 ± 0.8) Ma 的年龄数据,这一数据目前被认为是侏罗-白垩系界线最为可靠的年龄值^[109]。

近些年来,我国西藏南部地区侏罗-白垩系界线研究取得了一系列进展。西藏是我国为数不多的几个发育海相侏罗-白垩纪地层的地区,界线地层被划分为维美组和甲不拉组/桑秀组。万晓樵等^[104]通过菊石化石研究,发现桑秀组底部存在菊石 *Virgatosphinctes*、*Aulocosphinctes* 的消失和 *Spiticeras* 的出现的现象,并且在浪子卡甲不拉剖面底部(2~9 层)发现了钙质微体化石 *Nannoconus steinmannii minor*,表明侏罗-白垩系界线就位于维美组和桑秀组之间^[104,110]。最近,Liu 等^[54]对西藏南部浪子卡地区桑秀组下部 4 个火山岩样品进行了锆石 U-Pb (SIMS)测年,获得了 140~142 Ma 的高精度年龄,并且明确指出该年龄代表了 Berriasian 中期年龄,也即为西藏南部特提斯域 Berriasian 底界 *P. Beckmanni-N. St. Minor* 间隔带(NJK-C)之上 *N. St. Minor* 带(NK-D)的年龄。Liu 等^[54]成果的主要贡献之一就是,在东特提斯的藏南侏罗-白垩系过渡层位识别出具有全球性可对比意义的钙质超微化石带,并且还获得位于白垩系底界 Berriasian 阶之上 *N. St. Minor* 带(NK-D)的实测年代学数据(140~142 Ma),这一成果充分地说明和确定了 Berriasian

底界年龄肯定要老于 141~142 Ma。此外,东特提斯的藏南侏罗-白垩系过渡层定年样品中还存在几颗有效年龄为 144 Ma 的锆石(柳永清未发表数据),因此,我们有充分理由认为,藏南地区可能存在侏罗-白垩系界线,并且侏罗-白垩系界线年龄很可能与 Ogg^[107]以及 ICS(2013)^[93]建议的 145 Ma 数据相近。

与此同时,Vennari 等^[111]发表了对安第斯地区侏罗-白垩系界线高精度 U-Pb 年代学的研究成果。安第斯地区侏罗-白垩系界线钙质微体化石研究成果再次证实,侏罗-白垩系界线位于 Berriasian 底界 *N. Kamptneri minor* 带^[111-114]。而且 Vennari 等^[111]对 *N. Kamptneri minor* 层之上约 22 m 处凝灰岩层进行了锆石 U-Pb 定年,获得(137.9 ± 0.9) Ma 的 SHRIMP 年龄和(139.55 ± 0.09) Ma 的 TIMS 年龄。从 Vennari 等^[111]测年方法和结果来看,后者(TIMs)精度明显要高于前者。虽然 Vennari 提出将 140 Ma 作为侏罗-白垩系界线,但显然 Berriasian 底界年龄应该大于 140 Ma,因为 *N. Kamptneri minor* 带距离其上定年凝灰岩(ca. 140 Ma)还有约 22 m 厚泥页岩(时间间隔)。因此,无论是 Liu 等^[54]还是 Vennari 等^[111]的研究成果都显示,在未来侏罗-白垩系界线年代学精确确定上,145 Ma 的数据仍具有挑战性和倾向性,并且侏罗-白垩系界线老于 140~142 Ma 是无疑的,也是有充分科学依据和事实证据与全球性普遍性的。因此,根据 Liu 等^[54]和 Vennari 等^[111]最新发表研究成果看,目前接受 ICS(2013)^[93]将 145 Ma 作为侏罗-白垩系界线的建议可能更为适宜。虽然国际侏罗-白垩系界线年龄的最终确定还需更多高精度年龄数据来限定和将来进一步的研究成果支持,但目前最新研究成果都表明了 145 Ma 作为国际侏罗-白垩系界线的可行性。与此同时,具有 154~137 Ma 年龄区间的土城子组内部也显然存在着陆相侏罗-白垩系界线,是未来的陆相-海相侏罗-白垩系界线的整合、对比探索工作的潜在目标对象。

4 结论

综合近年来已发表的针对土城子组的所有同位素年代学数据,将土城子组年龄限定在 154~137 Ma,土城子组生物地层学研究成果指示的年代学结果与其一致;最新的侏罗-白垩系界线研究成果和数据支

持了 ICS 2013 年提出的将 145 Ma 作为侏罗-白垩系界线年龄的方案;土城子组时代为晚侏罗世—早白垩世,土城子组内部发育陆相侏罗-白垩系界线;国际地层年表及界线或 GSSP 及其地层对比应由海相生物地层来完成;陆相古地理、古生态环境具有极端差异和变化,利用陆相生物演化阶段来改变国际 J/K 界线位置应谨慎而慎之;陆相生物地层学及其生物演化在划分 GSSP 或建立全球对比(界线),特别是国际 J/K 界线位置和生物学涵义,需借助海陆交互的桥梁和同位素年代地层学成果,应优先服从海相地层及其生物演化所划分的标志与结果。

感谢万晓樵教授和彭善池研究员的约稿,感谢审稿人提出的有益修改意见和编辑辛勤的劳动。

参考文献

- [1] Ren J Y, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344: 175-205.
- [2] Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 103-119.
- [3] Zhang J H, Gao S, Ge W C, et al. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, north-eastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. *Geochemical Geology*, 2010, 276: 144-165.
- [4] Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 167-193.
- [5] 许欢,柳永清,刘燕学,等. 阴山-燕山地区晚侏罗世-早白垩世土城子组地层、沉积特征及盆地构造属性分析[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 88-106.
- [6] Zhou Z H, Jin F, Wang Y. Vertebrate assemblages from the middle-late Jurassic Yanliao Biota in Northeast China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17: 252-254.
- [7] Sun G, Dilcher D L, Zheng S, et al. A search of the first flower: A Jurassic angiosperm, *Archaeofructus*, from north-east China[J]. *Science*, 1998, 282: 1692-1695.
- [8] Xu X, Wang X, Wu X. A dromaeosaurid dinosaur with a filamentous integument from the Yixian Formation of China [J]. *Nature*, 1999, 401: 262-266.
- [9] Xu X, Wang K B, Zhang K, et al. A gigantic feathered dinosaur for the Lower Cretaceous of China[J]. *Nature*, 2012, 484: 92-95.
- [10] Ji Q, Luo Z X, Yuan C X, et al. The earliest known eutherian mammal[J]. *Nature*, 2002, 416: 816-822.
- [11] Wang X, Alexander W, Zhou Z, et al. Pterosaur diversity and faunal turnover in Cretaceous terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2005, 437: 875-879.
- [12] Zhou Z H. Evolutionary radiation of the Jehol Biota: Chronological and ecological perspectives [J]. *Geological Journal*, 2006, 41: 377-393.
- [13] Hu D Y, Hou L, Zhang L, et al. A pre-Archaeopteryx troodontid theropod from China with long feathers on the metatarsus[J]. *Nature*, 2009, 461: 640-643.
- [14] Ji Q, Luo Z, Yuan C, et al. A swimming mammaliaform from the Middle Jurassic and ecomorphological diversification of early mammals[J]. *Science*, 2006, 311: 1123-1127.
- [15] Meng J, Hu Y, Wang Y, et al. A Mesozoic gliding mammal from northeastern China[J]. *Nature*, 2006, 444: 889-893.
- [16] Liu Y Q, Kuang H W, Jiang X J, et al. Timing of the earliest known feathered dinosaurs and transitional pterosaurs older than the Jehol Biota[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 323/324/325: 1-12.
- [17] 季强,陈文,王五力,等. 中国辽西中生代热河生物群[M]. 北京:地质出版社,2004:123-375.
- [18] 和政军,李锦轶,牛宝贵,等. 燕山-阴山地区晚侏罗世强烈推覆-隆升事件及沉积响应[J]. *地质论评*, 1998, 44(4): 407-418.
- [19] 和政军,王宗起,任纪舜. 华北北部侏罗纪大型推覆构造带前缘盆地沉积特征和成因机制初探[J]. *地质科学*, 1999, 34(2): 186-195.
- [20] 和政军,牛宝贵,张新元. 晚侏罗世承德盆地砾岩碎屑源区分析及构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 655-666.
- [21] 和政军,牛宝贵,张新元. 冀西北尚义盆地对晚侏罗世构造活动的沉积响应[J]. *中国地质*, 2008, 35(2): 181-195.
- [22] Davis G A, Zheng Y, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China[J]. *Geological Society of America Memoir*, 2001, 194: 171-197.
- [23] Cope T D. Sedimentary Evolution of the Yanshan Fold-Thrust Belt, Northeast China[D]. California: Stanford University, 2003: 1-229.
- [24] Davis G A. The Late Jurassic "Tuchengzi/Houcheng" Formation of the Yanshan fold-thrust belt: An analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 331-345.
- [25] 许欢,柳永清,旷红伟,等. 阴山-燕山地区大青山组/后城组/土城子组沉积物源与盆地演化[J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 502-524.
- [26] 赵越. 燕山地区中生代造山运动及构造演化[J]. *地质论评*, 1990, 36(1): 1-13.

- [27] 马寅生,崔盛芹,赵越,等. 华北北部中生代构造体制的转换过程[J]. 地质力学学报, 2002, 8(1): 15-25.
- [28] 邵济安,孟庆任,魏海泉,等. 冀西北晚侏罗世火山-沉积盆地的性质及构造环境[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 751-761.
- [29] 李忠,刘少峰,张金芳,等. 燕山典型盆地充填序列及迁移特征: 对中生代构造转折的响应[J]. 中国科学: D辑, 2003, 33(10): 931-940.
- [30] 渠洪杰,张英利. 承德地区土城子组沉积特征及其构造意义[J]. 大地构造域成矿学, 2005, 29(4): 465-474.
- [31] 孙立新,赵凤清,王惠初,等. 燕山地区土城子组划分、时代与盆地性质探讨[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 445-453.
- [32] Xu H, Liu Y Q, Kuang H W, et al. U-Pb SHRIMP age for the Tuchengzi Formation, northern China, and its implications for biotic evolution during the Jurassic-Cretaceous transition[J]. Palaeoworld, 2012, 21(3/4): 222-234.
- [33] 王思恩,高林志,万晓樵,等. 冀北-辽西地区土城子组的地质时代、年龄及其国际地层对比[J]. 地质通报, 2013, 32(11): 1-18.
- [34] 旷红伟,柳永清,刘燕学,等. 兴蒙造山区及邻区早白垩世盆地岩石地层格架与沉积古地理演化[J]. 地质通报, 2013, 32(7): 1063-1084.
- [35] 张永忠,张建平,吴平,等. 辽西北票地区中-晚侏罗世土城子组恐龙足迹化石的发现[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 561-566.
- [36] 张宏,袁洪林,胡兆初,等. 冀北滦平地区中生代火山岩地层锆石 U-Pb 测年及启示[J]. 地球科学, 2005, 30(6): 707-720.
- [37] 张宏,韦忠良,柳小明,等. 冀北-辽西地区土城子组的 LA-ICP-MS 测年[J]. 中国科学: D辑, 2008, 38(8): 960-970.
- [38] Zhao X J, Cheng Z W, Xu X, et al. A new ceratopsian from the Upper Jurassic Houcheng Formation of Hebei, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(4): 467-473.
- [39] 刘健,赵越,柳小明. 冀北承德盆地髫髻山组火山岩的时代[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2617-2630.
- [40] Cope T D, Shultz M R, Graham S A. Detrital record of Mesozoic shortening in the Yanshan belt, NE China: Testing structural interpretations with basin analysis[J]. Basin Research, 2007, 19: 253-272.
- [41] 杨蔚. 辽西中生代火山岩年代学及地球化学研究: 对华北克拉通岩石圈减薄机制的制约[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007: 42-68.
- [42] 舒柯文,洪大卫,提姆·科普,等. 记河北省后城组新发现之小型兽脚类足迹[J]. 古脊椎动物学报, 2009, 47(1): 33-52.
- [43] 张建平,邢立达, Gierliński S D, 等. 中国北京恐龙足迹的首次报道[J]. 科学通报, 2012, 57(2/3): 144-152.
- [44] 柳永清,旷红伟,彭楠,等. 冀西北尚义上侏罗统-下白垩统后城组恐龙足迹新发现及生物古地理意义[J]. 古地理学报, 2012, 14(5): 617-627.
- [45] Xing L D, Gierliński G D, Harris J D, et al. A probable crouching theropod dinosaur trace from the Tuchengzi Formation in Chicheng area, Hebei Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(1): 20-25.
- [46] Chen P J, Li J, Matsukawa M, et al. Geological ages of dinosaur-track-bearing formations in China[J]. Cretaceous Research, 2006, 27(1): 22-32.
- [47] Yabe H, Inai Y, Shikama T. Discovery of dinosaurian footprints from the Cretaceous (?) of Yangshan, Chinchou. Preliminary note[J]. Proceedings of the Imperial Academy, 1940, 16(10): 560-563.
- [48] Lockley M G, Matsukawa M, Ohira H, et al. Bird tracks from Liaoning Province, China: New insights into avian evolution during the Jurassic-Cretaceous transition[J]. Cretaceous Research, 2006, 27: 33-43.
- [49] Swisher C C, 王筱林,周忠和,等. 义县组同位素年代学新证据及土城子组 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定[J]. 科学通报, 2002, 46(23): 2009-2012.
- [50] Chang S C, Zhang H C, Renne P R, et al. High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age for the Jehol Biota[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 280: 94-104.
- [51] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part in the Sino-Korea craton[J]. Geology, 1992, 20: 339-342.
- [52] Ames L, Tilton G R, Zhou G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. Geology, 1993, 21(4): 339-342.
- [53] Sigoyer D J, Chavagnac V, Blichert-Toft J, et al. Dating the Indian continental subduction and collisional thickening in the northwest Himalaya: Multichronology of the Tso Moriri eclogites[J]. Geology, 2000, 28(6): 487-490.
- [54] Liu Y Q, Ji Q, Jiang X J, et al. U-Pb zircon ages of Early Cretaceous volcanic rocks in the Tethyan Himalaya at Yangzuoyong Co Lake, Negarze, southern Tibet, and implications for the Jurassic/Cretaceous boundary[J]. Cretaceous Research, 2013, 40: 90-101.
- [55] 杨进辉,吴福元,邵济安,等. 冀北张宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素[J]. 地球科学, 2006, 31(1): 71-80.
- [56] 牛宝贵,和政军,宋彪,等. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义[J]. 地质通报, 2003, 2(2): 140-141.
- [57] 柳永清,刘燕学,姬书安,等. 内蒙古宁城和辽西凌源热水汤地区道虎沟生物群与相关地层 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及有关问题的讨论[J]. 科学通报, 2006, 51(19): 2273-2282.
- [58] 萧宗正,杨洪连,单青生. 北京中生代地层及生物群[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 119-121.
- [59] 许欢,柳永清,旷红伟,等. 华北晚侏罗世-早白垩世风成砂沉积及其古地理和古生态学意义[J]. 古地理学报, 2013, 15(1): 11-30.

- [60] 王五力, 张宏, 张立君, 等. 土城子阶、义县阶标准地层剖面及其地层古生物、构造-火山作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 21-91.
- [61] 王思恩, 季强. 中国陆相上侏罗统土城子阶综合研究报告[R]//第三届全国地层委员会. 中国主要断代地层建阶研究报告. 北京: 地质出版社, 2008: 105-114.
- [62] 王思恩, 李罡. 冀北、辽西地区上侏罗统土城子组的新叶肢介化石[J]. 古生物学报, 2008, 47(3): 319-325.
- [63] 庞其清. 河北燕山地区中、上侏罗统介形虫化石及其地质意义[J]. 石家庄经济学院学报, 1982(1/2): 89-110.
- [64] 杨仁泉. 河北侏罗-白垩纪介形类化石组合及其地层意义[J]. 河北地质学院学报, 1984(4): 30-46.
- [65] 郑少林, 张武, 丁秋红. 辽西中上侏罗统土城子组植物化石的新发现[J]. 古生物学报, 2001, 40(1): 67-85.
- [66] 郑少林. 冀北辽西土城子组的划分对比及时代[C]//《第三届全国地层会议论文集》编委会. 第三届全国地层会议论文集. 北京: 地质出版社, 2000: 227-232.
- [67] 蒲荣干, 吴洪章. 辽西中晚侏罗世孢粉组合[J]. 沈阳地质矿产研究所所刊, 1982(4): 169-184.
- [68] 张望平. 中国东部一些地区侏罗纪孢粉组合[M]//中国地质科学院研究所地层组. 中国东部构造-岩浆演化及成矿规律(二): 中国东部侏罗纪-白垩纪古生物地层. 北京: 地质出版社, 1989: 1-20.
- [69] 郑月娟, 陈树旺, 丁秋红, 等. 冀北-辽西地区侏罗纪土城子组的时代归属[J]. 地质与资源, 2010, 19(4): 292-305.
- [70] 洪友崇. 河北后城组昆虫化石的新发现和后城昆虫群的建立[J]. 北京地质, 1997(1): 1-7.
- [71] 周忠和, 贺怀宇, 汪筱林. 侏罗系-白垩系界线和我国东北地区下白垩统陆相地层相关问题的探讨[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 541-555.
- [72] 陈丕基. 热河动物群的分布与迁移[J]. 古生物学报, 1988, 27(6): 659-683.
- [73] 汪筱林, 王元青, 王原, 等. 辽西四合屯及周边地区义县组下部地层层序与脊椎动物化石层位[J]. 古脊椎动物学报, 1998, 36(2): 81-101.
- [74] 王五力, 张宏, 张立君, 等. 辽宁义县-北票地区义县组地层层序[J]. 地层学杂志, 2003, 27(3): 227-232.
- [75] Chen P J, Wang Q F, Zhang H C, et al. Jianshangou bed of the Yixian Formation in west China[J]. Science in China: Series D, 2005, 48(3): 298-312.
- [76] 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等. 冀北张家口组、义县组火山岩 SHRIMP 定年兼论中国东部大兴安岭兴安岭群和东南沿海火山岩地层时代[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 751.
- [77] Yang W, Li S G, Jiang B Y. New evidence for Cretaceous age of the feathered dinosaurs of Liaoning: Zircon U-Pb SHRIMP dating of the Yixian Formation in Sihetun, north-east China[J]. Cretaceous Research, 2007, 28: 177-182.
- [78] He H Y, Pan Y X, Tauxe L, et al. Toward age determination of the M0r (Berremian-Aptian boundary) of the Early Cretaceous[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008, 169: 41-48.
- [79] 王清利, 陈文, 张彦. 辽西喀左县孤山义县组安山岩激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 125-133.
- [80] Barrett P M, Butler R J, Wang X L, et al. Cranial anatomy of the iguanodontoid ornithomimid *Jinzhousaurus yangi* from the Lower Cretaceous Yixian Formation of China[J]. Acta Palaeontologica Polonica, 2009, 54(1): 35-49.
- [81] 孙荣双, 季建清, 高克勤, 等. 辽西新台门白垩纪火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其对棘刺化石层时代的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3397-3410.
- [82] 白启飞, 陈丕基. 白垩纪年代地层学研究简述[J]. 地层学杂志, 2005, 29(2): 114-123.
- [83] 章桂森, 严惠君. “国际地层表”与 GSSP[J]. 地层学杂志, 2005, 29(2): 188-204.
- [84] Wan X Q, Chen P J, Wei M J. The Cretaceous system in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 81(6): 957-983.
- [85] 陈丕基. 中国陆相侏罗、白垩系划分对比评述[J]. 地层学杂志, 2000, 24(2): 114-119.
- [86] 全国地层委员会. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 72.
- [87] 柳永清, 庞其清, 李佩贤, 等. 冀北滦平陆相侏罗-白垩系生物地层界线及候选层型研究进展[J]. 地质通报, 2002, 21(3): 176-180.
- [88] 田树刚, 庞其清, 牛绍武, 等. 冀北滦平盆地陆相侏罗系-白垩系界线候选层型剖面初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1170-1179.
- [89] 庞其清, 田树刚, 李佩贤, 等. 冀北滦平盆地大北沟组-大店子组介形类生物地层和侏罗系-白垩系界线[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 348-356.
- [90] 牛绍武, 田树刚, 庞其清. 冀北滦平盆地大店子组叶肢介生物地层特征及陆相侏罗系-白垩系界线[J]. 地质通报, 2010, 29(7): 961-979.
- [91] 王五力, 张立君, 郑少林, 等. 义县阶的时代与侏罗系-白垩系界线[J]. 地质论评, 2005, 51(3): 234-242.
- [92] Remane J. International Stratigraphic Chart, with Explanatory Note. Paris[C]//Proceedings of 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro, 2000: 16.
- [93] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS International Chronostratigraphic Chart[J]. Episode, 2013, 36(3): 199-204.
- [94] 季强, 柳永清, 姬书安, 等. 论中国陆相侏罗系-白垩系界线[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 336-339.
- [95] 顾知微, 沙金庚, 李子舜, 等. 海相侏罗纪双壳类在中国东北地区东部的产出与其对亚洲中、东部非海相侏罗、白垩系分界研究的意义[J]. 古生物学报, 1987, 26(1): 1-7.
- [96] Sha J G. Cretaceous stratigraphy of northeast China: Non-marine and marine correlation[J]. Cretaceous Research,

- 2007, 28: 146-170.
- [97] Sha J G, Matsukawa M, Cai H W, et al. The Upper Jurassic and Lower Cretaceous of eastern Heilongjiang, northeast China; Stratigraphy and regional basin history[J]. *Cretaceous Research*, 2003, 24: 715-728.
- [98] Sha J G, Wan J P, Galina K, et al. Upper Jurassic and Lower Cretaceous of Sanjiang-Middle Amur basin: Non-marine and marine correlation[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(12): 1873-1889.
- [99] 沙金庚, Lucas S G. 非海相白垩系年代学和对标[J]. *地层学杂志*, 2012, 36(2): 137-152.
- [100] Allemenn F W, Grun W, Wiedmann J. Colloque surlimité Jurassique-Cretacee[J]. *Memoirs du Bureau du Recherches Geologiques et Minereres*, 1975, 86: 396.
- [101] Jeletzky J A. Jurassic-Cretaceous boundary beds of western and arctic Canada and the problem of the Thitnian-Berriasian stages in the Boreal Realm[J]. *Geological Association of Canada Special Paper*, 1984, 27: 175-255.
- [102] Matsuoka A. Jurassic and Lower Cretaceous radiolaria zonation in Japan and in the western Pacific[J]. *The Island Arc*, 1995, 4: 140-153.
- [103] Veevers J J. Gondwanaland from 650-500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185-100 Ma breakup: Supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 68: 1-132.
- [104] 万晓樵, 高莲凤, 李国彪, 等. 西藏江孜浪卡子一带的侏罗-白垩纪界线地层[J]. *现代地质*, 2005, 19(4): 479-487.
- [105] Aguirre-Urreta M B, Mourgues F A, Rawson P F, et al. The Lower Cretaceous Chanarillo and Neuquén Andean basins: Ammonoid biostratigraphy and correlations[J]. *Geological Journal*, 2007, 42: 143-173.
- [106] Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. *The Geologic Time Scale 2012*, 2-volume set[M]. Elsevier, 2012: 1144.
- [107] Ogg J G. Status of divisions of the international geologic time scale[J]. *Lethaia*, 2004, 37(2): 183-199.
- [108] Mahoney J J, Duncan R A, Tejada M L G, et al. Jurassic-Cretaceous boundary age and mid-ocean-ridge-type mantle source for Shatsky Rise[J]. *Geology*, 2005, 33: 185-188.
- [109] Ogg J G, Hinnov L A. *The Jurassic period*[M]//Gradstein F, Ogg J G, Schmitz M D, et al. *The Geologic Time Scale 2012*. Beijing: Elsevier, 2012: 731-791.
- [110] Wan X Q, Scott R, Chen W, et al. Early Cretaceous stratigraphy and SHRIMP U-Pb age constrain the Balanginian-Hauterivian boundary in southern Tibet[J]. *Lethaia*, 2011, 44: 231-244.
- [111] Vennari V V, Lescano M, Naipauer M, et al. New constraints on the Jurassic-Cretaceous boundary in the High Andes using high-precision U-Pb data[J]. *Gondwana Research*, 2013. doi: 10.1016/j.gr.2013.07.005.
- [112] Bralower T J, Monechi S, Thierstein H R. Calcareous nanofossil zonation of the Jurassic-Cretaceous boundary interval and correlation with the geomagnetic polarity timescale[J]. *Marine Micropaleontology*, 1989, 14: 153-235.
- [113] Casellato C E. Calcareous nanofossil biostratigraphy of Upper Callovian-Lower Berriasian from the Southern Alps, North Italy[J]. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 2010, 116: 357-404.
- [114] Wimbledon W A P, Casellato C E, Reháková D, et al. Fixing a basal Berriasian and Jurassic-Cretaceous (J-K) boundary: Is there perhaps some light at the end of the tunnel[J]? *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 2011, 117: 295-307.