

doi: 10.12029/gc20220316

魏荣珠, 庄其天, 闫纪元, 魏云峰, 杜艳伟, 范俊辉. 2022. 山西晋中盆地晚新生代地层划分、沉积环境及其先秦以来气候和湖泊演化[J]. 中国地质, 49(3): 912–928.

Wei Rongzhu, Zhuang Qitian, Yan Jiyuan, Wei Yunfeng, Du Yanwei, Fan Junhui. 2022. Late Cenozoic stratigraphic division and sedimentary environment of Jinzhong Basin in Shanxi Province, with the climate and lake evolution since the pre-Qin period (2500 years ago)[J]. *Geology in China*, 49(3): 912–928(in Chinese with English abstract).

山西晋中盆地晚新生代地层划分、沉积环境 及其先秦以来气候和湖泊演化

魏荣珠¹, 庄其天², 闫纪元³, 魏云峰¹, 杜艳伟¹, 范俊辉¹

(1. 山西省地质调查院, 山西太原 030006; 2. 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要:【研究目的】晋中盆地位于汾渭断陷盆地带的中部, 新生代最大沉积厚度超过 3800 m, 建立晋中盆地精确地层年代框架和高分辨率沉积层序对于理解汾渭断陷盆地带的演化、华北地区气候变化具有重要意义。【研究方法】本文对晋中盆地东北部晚新生代标准孔 ZK01 (钻孔深度 870.5 m) 岩心开展了年代学和沉积学研究。【研究结果】将 ZK01 孔揭示的松散沉积物分为 6 个岩性组。首次通过磁性地层学研究, 划分出 13 个正极性时段和 12 个负极性时段, 建立了 ZK01 孔地层年代框架。晋中盆地新生代沉积物底部最老年龄约 8.1 Ma, 将晋中盆地活动的起始时间从前人一般认为的上新世初期, 确定为中新世晚期, 提前了约 3 Ma。区内晚新生代地层划分为新近系中新统灞河阶(N₁⁴)和保德阶(N₁³), 上新统高庄阶(N₂¹)和麻则沟阶(N₂²), 第四系下更新统泥河湾阶(Qp¹), 中、上更新统和全新统。【结论】构造活动与气候变化是盆地沉积环境的主要控制因素, 共同导致了上新世早期和早更新世中晚期的两次湖泊大规模发育。全新世时期, 早中期即先秦(约 2.5 ka 以前), 盆地中仍是河湖共存阶段; 晚期(2.5 ka 以来), 出现湖消河长的局面, 直至明、清时期湖泊全部消失, 气候变化和人类活动影响是盆地中湖泊最终消失的主要原因。

关键词: 气候变化; 先秦(2500 年前); 晚新生代; 沉积环境; 磁性地层学; 地层划分; 环境地质调查工程; 晋中盆地; 山西
创新点: 首次通过磁性地层学将晋中盆地发育时间确定为中新世晚期约 8.1 Ma; 盆地的湖泊发育早期主要受构造和气候控制, 全新世以来气候变化和人类活动造成湖泊最终消亡。

中图分类号: P534.6 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2022)03–0912–17

Late Cenozoic stratigraphic division and sedimentary environment of Jinzhong Basin in Shanxi Province, with the climate and lake evolution since the pre-Qin period (2500 years ago)

WEI Rongzhu¹, ZHUANG Qitian², YAN Jiyuan³, WEI Yunfeng¹, DU Yanwei¹, FAN Junhui¹

(1. Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030001, Shanxi, China; 2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081)

收稿日期: 2020–01–02; 改回日期: 2020–04–16

基金项目: 中国地质科学院地质研究所项目(121201102000150012–05)、山西省国土资源厅地勘基金项目(HXCT01–2018F005)联合资助

作者简介: 魏荣珠, 男, 1966 年生, 正高级工程师, 主要从事区域地质、第四纪地质研究工作; E-mail: jzweirongzhu@126.com。

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] Jinzhong Basin is located in the middle of the Fen-Wei Fault Depression Basins, in which the maximum thickness of the Cenozoic sedimentary layer exceeds 3800m. The establishment of the precise stratigraphic framework and the high-resolution sedimentary sequence of Jinzhong Basin is vital to understanding the evolution of the Fen-Wei Fault Depression Basins and the climate changes in North China. **[Methods]** In this paper, the chronology and sedimentology methods were used on the drill cores of the late Cenozoic standard borehole ZK01 (870.5m in depth) in the northeast of the Jinzhong Basin. **[Results]** The loose sediments in the borehole ZK01 were divided into 6 lithological formations. By means of magnetostratigraphy, the stratigraphic time frame was built with 13 normal polarity periods and 12 reverse polarity periods for the first time. The oldest Cenozoic sediments at the bottom of Jinzhong Basin is approximately 8Ma, moving the starting time of Jinzhong Basin activity forward about 3 Ma, from early Pliocene as previously believed to late Miocene. The late Cenozoic strata in this region are divided into Neogene Miocene Baodean Stage (N_1^4) and Bahean stage (N_1^5), Pliocene Gaozhuangian Stage (N_2^1) and Mazegouan Stage (N_2^2), Quaternary lower Pleistocene Nihewanian Stage(Qp¹), middle Pleistocene, upper Pleistocene, and Holocene. **[Conclusions]** Tectonic activity and climate change are the main controlling factors of the sedimentary environment in the basin, which results in two periods of large-scale lake development in the early Pliocene and middle-late early Pleistocene. In the early-middle Holocene, i.e., pre-Qin period (circa 2.5ka ago), rivers and lakes were in the coexistence stage in the basin; In the late Holocene (circa 2.5ka after), lakes atrophied, and rivers dilated; Then the lakes vanished in Ming and Qing period. Climate change and the impact of human activities are the main reasons for the eventual disappearance of the lakes in the basin.

Key words: climate change; pre-Qin(2500 years ago); Late Cenozoic; sedimentary environment; magnetic stratigraphy; stratigraphic division; environmental geological survey engineering; Jinzhong Basin; Shanxi

Highlights: The development time of the Jinzhong Basin was firstly determined as in the late Miocene at 8.1 Ma by magnetostratigraphy. The lakes in the basin were mainly controlled by tectonism and climate in the early stage. Since the Holocene, climate change and human activities have caused the lakes to disappear.

About the first author: WEI Rongzhu, male, born in 1966, senior engineer, mainly engaged in the study of regional geology and Quaternary geology; E-mail: jzweirongzhu@126.com.

Fund support: Supported by project of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (121201102000150012-05) and Geological Prospecting Fund Project of Bureau of National Territory Resources of Shanxi Province (HXCT01-2018F005).

1 引言

汾渭断陷盆地是鄂尔多斯周缘地槽系重要组成部分,是华北重要的板内构造变形区,由多个左阶排列断陷盆地构成,各断陷盆地的形成机制一直是新构造研究的热点,对此也存在较大的争议(武烈等, 1981; 刘锁旺和甘家思, 1981; 陈国达, 1984; 孙继源等, 1992; 张崇立, 1993; 李清武, 2005; 邢作云等, 2005; 张世民, 2006; 魏荣珠等, 2017)。晋中盆地位于汾渭断陷盆地中部,北邻忻定盆地,南为临汾—运城盆地,东西两侧分别为太行山脉和吕梁山脉,盆地呈北东向长方形展布,长约100 km,宽约40 km,面积近6000 km²。晋中盆地由清徐凹陷和周缘断阶等次级构造单元组成,主要发育有北东向、北北东向和北北西向3组断裂,它们相互交接控制了断陷的基本轮廓(图1)。晚新生代时期,

由于晋中盆地内部和周缘的山地、丘陵区具有不同的沉积环境,导致形成不同的新生代沉积地层系统。山地、丘陵区为黄土高原区土状堆积序列、河流阶地堆积序列,断陷盆地区为河湖相堆积序列(山西省地质矿产局, 1989; 山西省地质矿产局, 1997)。

晋中盆地(平原区)内晚新生代沉积最厚处可达3800 m,与盆地外围的露头剖面相比,其厚度超出数十倍。不同研究者对盆地沉积物的划分有不同的认识(曹家欣等, 1980; 张锡麒, 1983; 王乃樑等, 1996),加之缺少精确的新生代测年方法和手段,有一些关键问题仍未得到解决,或取得一致认识。如第四纪底界的准确位置,晋中盆地活动的起始时间,构造活动的阶段性划分等等。这些问题阻碍了我们正确认识晋中盆地乃至汾渭断陷盆地的形成和演化,因此,应用精确的新生代定年手段

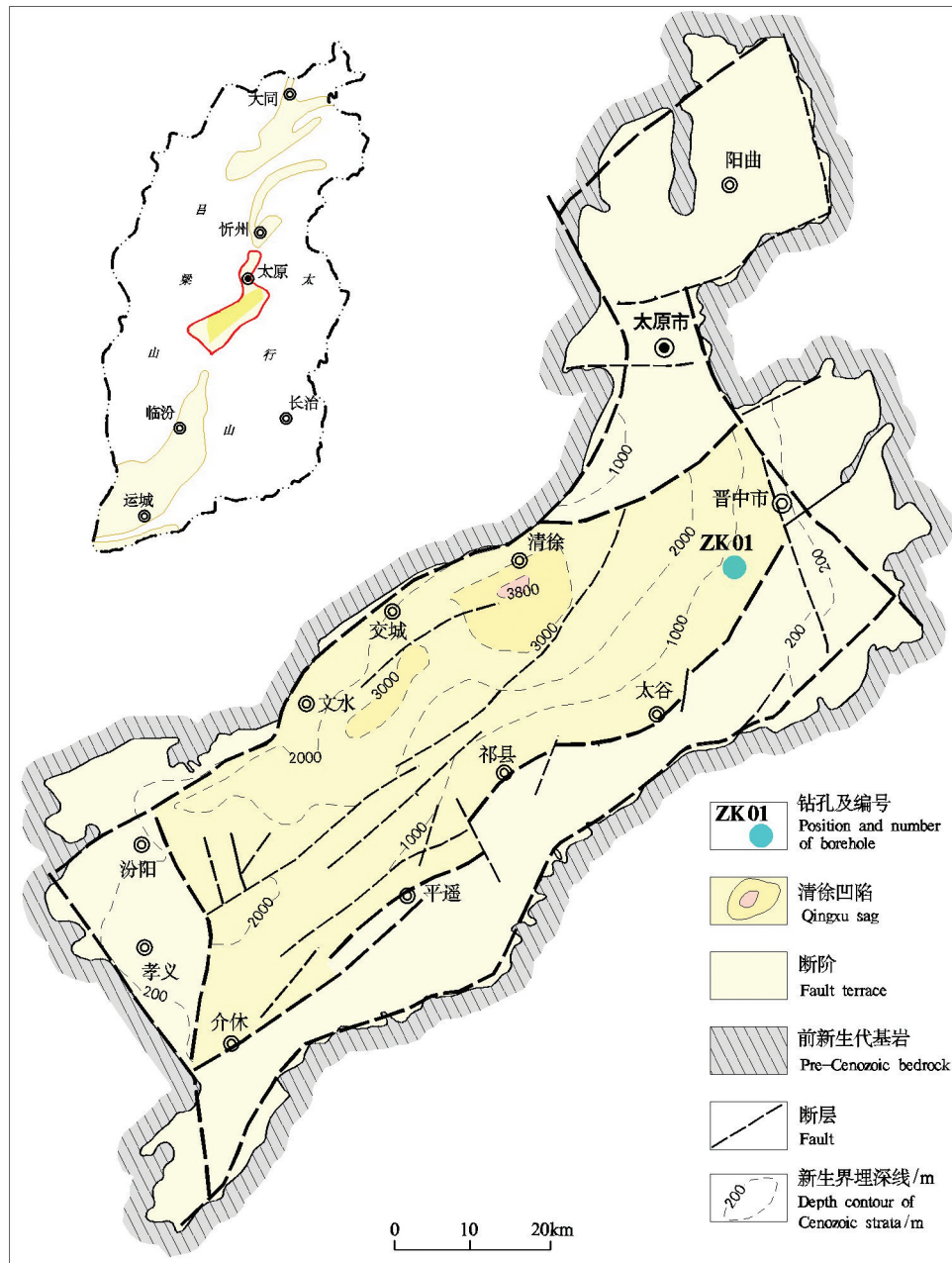


图1 晋中盆地地质构造单元划分及ZK01钻孔位置图

Fig.1 Structural units of Jinzhong Basin and location of borehole ZK01

对盆地地层进行准确的划分,是开展盆地活动构造、沉积速率变化、岩相古地理以及环境演变研究的前提和基础。

为了建立晋中盆地晚新生代地层格架,进行相邻盆地间地层划分和对比,笔者在晋中盆地中部开展了清徐县幅、徐沟幅1:5万覆盖区区域地质调查工作,部署了ZK01标准孔并取得了对应的岩

心。研究表明,磁性地层学是建立晚新生代地层年代框架的有效手段(Opdyke and Channell, 1996; Zhu et al., 2001; Guo et al., 2002; 刘进峰等, 2005; 姚政权等, 2006; 邓成龙等, 2007; 朱日祥等, 2007; 王红强等, 2007; 缪卫东等, 2016)。本文应用磁性地层学技术,对ZK01孔晚新生代地层开展了精细的年代研究和地层划分,为晋中盆地晚新生代区域地

层对比、古环境演化研究提供可靠的依据。

2 晋中盆地晚新生代沉积地层划分

山西地区晚新生代地层较为发育,也是中国华北地区晚新生代地层研究最早的地区之一。从中新世晚期到更新世,保德阶、高庄阶、麻则沟阶、泥湾阶的层型剖面都分布在山西或周边。

山西中部晋中盆地晚新生代地层较为系统研究始于1975年,山西省地质局石油队1975年在本区开展石油普查工作时,对全区进行了地震普查及大量钻探工作,完成钻井19口,其中7口穿透新生界打至基底。1979年完成的《晋中断陷石油普查评价报告》依据钻井岩心的岩石特征及古生物资料,对晋中盆地内晚新生代地层开展了研究工作,将晚新生代地层划分为7个沉积组,在盆地内部及盆地边缘进行了横向对比。之后,许多学者先后在晋中盆地东南缘太谷一带晚新生代地层进行了研究工作(曹家欣等,1980;张锡麒,1983;王乃樑等,1996),取得了一定进展。1997年,山西省地质矿产局在开展“全国地层多重划分对比研究”时,《山西省岩石地层》对前人研究成果进行了综合和清理(山西省地质矿产局,1997),并重新划分,同时对盆地其他已有的地层名称,建议停止使用或作为同物异名而不再使用。本文岩石地层划分基本沿用《山西省岩石地层》中划分方案(表1),下面对晋中盆地晚新生代河湖相各岩石地层组的原始定义进行简要介绍如下:

下土河组:1975年张士亚等以太谷县下土河创名。为山西中部各新生代裂陷盆地边缘,松散堆积

层的最底部组级岩石地层单位。下部为棕褐色砾石层夹灰紫色粘土、砂质黏土和薄层砂砾石层或其凸镜体;上部为棕黄、灰褐色砂层与棕黄、棕红、灰褐色亚黏土、黏土互层。本组中哺乳动物化石丰富,主要有:新俄罗斯枝角鹿(*Cervavitus novorsisae*)、三趾马(*Hipparion* sp.)、鸵鸟(*Struthio* sp.)等。以不整合覆盖于中生界砂岩之上。

小白组:1975年张士亚等以太谷县小白村创名。为山西中部各新生代裂陷盆地边缘松散堆积层下部,覆盖于下土河组之上的一套富含动植物化石的河湖相灰色、灰绿色黏土、亚黏土夹黄色细砂、砂砾石层等堆积。在本组上部采到褶齿三趾马(*Hipparion ptychodus*)、腔齿三趾马(*H. caelophyes*)等化石。

红崖组:1975年张士亚等以太谷县红崖村创名。岩性为棕红色、棕褐色砂质黏土夹黄色砂层,富含灰质团块。在红崖组中未发现有意义的化石。《山西省岩石地层》未采用该组名,而用静乐组。本文认为仍用红崖组为宜,为与静乐红土同时期的河湖相沉积。

大沟组:1973年曹家欣等创名于太谷县王公乡大沟村一带。为山西中部新生代裂陷盆地边缘,红崖组红土之上的一套河湖相地层。主要岩性为黄色砾石层与灰紫色黏土、砂质黏土互层和灰绿色黏土及少量砾石层。该组中采到了三趾马(*H cf.plat yodus*)、贺风三趾马(*Hipparion cf.houfenense*)和三趾马(*Hipparion* sp.)、龟鳖类(*Chlonia* gen. et. sp. *Indet*)、羚羊(*Gazella* sp.)、峭枕鼯鼠(*Prosiphneus truncatus*)及*Metacervulies* sp.等化石。

木瓜组:1973年曹家欣等创名于太谷县王公、

表1 晋中盆地晚新生代岩石地层划分沿革
Table 1 History of Late Cenozoic stratigraphic division in Jinzhong Basin

张锡麒等(1983)			曹家欣等(1980)		王乃樑等(1996)		山西省岩石地层(1997)		本文								
时代	晋中断陷	太谷地区	时代	太谷地区	时代	太谷地区	时代	晋中盆地	时代	晋中盆地							
Q	汾河群	马兰组	Q	木瓜组	Qp ¹	木瓜组	Qp ¹	Qh-Qp ²	汾河组	Qh-Qp ²	汾河组						
		离石组										大沟组	大沟组	Qp ¹	木瓜组	Qp ¹	木瓜组
		柳沟组															
N ₂	义安组	大沟组	Q-N	南畔组	N ₂	小白组	N ₂	红崖组	静乐组	N ₂ ²	红崖组						
		红崖组										下土河组	下土河组	N ₂	小白组	N ₂ ¹	小白组
	史家社组	下土河组	下土河组	N ₂	下土河组	N ₂ ¹	下土河组										
	西谷组							N	深凹组	N ₂	下土河组						
	胡村组	下土河组	下土河组	N	深凹组	N ₂	下土河组					二段					
城子组	下土河组							下土河组	N	深凹组	N ₂		下土河组	一段			
王吴组		下土河组	下土河组	N	深凹组	N ₂	下土河组					一段					

红崖一带。为一套河流相灰黄色细砂夹少量棕褐色亚黏土及薄板状泥灰岩,有时还夹砂砾石层凸镜体。化石有三门马(*Equus cf. sanmeniensis*)、古中国野牛(*Bison cf. palaeosinensis*)、丁氏鼯鼠(*Myospalax cf. tingi*)和龟鳖类。

汾河组:1978年张士亚等在晋中盆地进行石油普查工作时创建。为山西中部裂陷盆地内,最上部以灰黄色调为主夹少量灰色的一套以河流相为主的河湖相沉积。岩性由砂质黏土、砂、砾石组成。

3 钻孔位置及岩心特征

ZK01孔位于晋中市榆次区修文镇陈侃村西约1 km处(37°35'37"N, 112°39'47"E),该块段地势平坦,海拔750~850 m,新生界底板埋深约800 m,埋深线走向北东,较为稳定(图1)。钻孔设计孔深800 m,钻探施工时间为2018年9月至2019年1月,钻孔实际施工深度为870.50 m,共钻进取心340回次,整孔岩心采取率为85.09%。

ZK01孔岩性主要为黏土、砂质黏土、黏土质粉砂、粉砂、细砂及砂砾石等,局部见钙质结核、钙板层、螺类化石等。整孔沉积环境变化明显,在野外现场进行精细编录,野外分层689层。同时进行了钻孔测井工作,包括伽马射线、自然电位和电阻率等,岩层物性数据有助于岩相识别和沉积环境划分(Roger, 1984)。通过室内研究,按岩性、成分进行合并,综合分层93层。根据沉积物颜色、沉积环境和沉积构造等特点,并与盆地中收集的12个石油钻孔资料及盆地东部边缘剖面进行对比,将ZK01孔揭示的晚新生代松散沉积物从下至上归纳为6个岩性组(段):即中新统下土河组一段(N_1x^1)、二段(N_1x^2),上新统小白组(N_2xb)、红崖组(N_2h),下更新统大沟组(Qp^1d)、木瓜组(Qp^1m);更新统一全新统汾河组(Qf)(表2)。

4 样品采集、测试

在野外对ZK01钻孔岩心进行了高分辨率的古地磁样品采集,古地磁样品的现场采集是磁性地层划分的基础。采样使用陶瓷刀、塑料板等无磁性工具,对黏土、黏土质粉砂、粉砂质黏土、粉砂、细砂以0.5 m间隔取样,中砂、粗砂以1 m间隔取样,对于较难获取古地磁标准样品的砂砾层不取样,实际采集

古地磁定向样品1506件。钻孔上部样品在野外用直径2.5 cm、长度2.2 cm的石英管采集,并用箭头标注样品的底面。用石英管无法采集时,采集定向手标本,在室内用手工钢锯加工成规格2 cm×2 cm×2 cm的立方体。

经室内归纳、筛选,按照平均1 m的间隔选出780件样品进行测试。样品测试由中国地质大学(武汉)古地磁实验室完成。所有测试操作都在磁屏蔽屋内完成,保证样品不受周边磁场环境影响。用美国2GEnterprises公司生产的超导磁力仪(型号为755-4K)进行交变退磁和剩磁测量,仪器测试精度范围 $1.0\times 10^{-12}\sim 2.0\times 10^{-3}\text{Am}^2$ 。

古地磁样品系统交变退磁场设置为:NRM(不加场)、20 Gs、50 Gs、100 Gs、150 Gs、200 Gs、250 Gs、300 Gs、350 GS、400 Gs、450 Gs、500 Gs、600 Gs、700 GS、800 GS、900 Gs。选取48块硬度大的块状样品进行系统热退磁,温度设置为:NRM(室温)、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、450℃、500℃、525℃、550℃、585℃、610℃。

在样品加工和测试过程中,有45块样品由于固结程度差而完全破碎,不能获得有效剩磁方向数据。735块样品经系统退磁和剩磁测量后,获得稳定剩磁,其中631块样品的剩磁角偏差 $<10^\circ$ 。由于样品为钻孔岩心,磁偏角无法确定,所以只能用磁倾角恢复沉积物形成时期的磁极方向。为了获得更准确的磁倾角,避免由于误差而导致错误的倾向,磁倾角在 $\pm 15^\circ$ 以内的数据也被剔除,最终获得具有稳定特征剩磁的483块样品,测得了古地磁剩磁方向。

交变退磁和热退磁数据处理采用Zijderveld图解法,特征剩磁方向的统计采用Kirschvink主分量分析法。退磁结果(图2)显示,多数样品的粘滞剩磁在5~10 mT和150~200℃基本被移除,剩磁强度显著减小,剩磁方向发生明显变化。在 $>20\text{ mT}$ 和 $>400^\circ\text{C}$ 的退磁结果中,特征剩磁可以比较清楚地被分离出来,并呈现出较好的逐渐趋向原点的线性特征。

5 结果和分析

5.1 ZK01孔磁性地层结果

极性事件的确定原则上以至少3块连续的相同极性样品为标准。极性不连续的单个样品不参与极性事件划分,连续2个同样极性样品以半宽极性

表2 晋中盆地 ZK01 孔岩石地层特征
Table 2 Lithostratigraphic features of borehole ZK01 in Jinzhong Basin

组	层号	起/m	止/m	岩性	组	层号	起/m	止/m	岩性
汾河组	1	0	8.45	棕色(7.5YR4/4)亚砂土,植物根系	红崖组	48	263.8	270.2	深红棕色(2.5YR4/3)细砂夹砂质黏土
	2	8.45	14.9	棕色(7.5YR4/3)粉砂		49	270.2	276.5	深灰棕色(10YR4/2)黏土夹中厚层粉砂
	3	14.9	21	棕色(7.5YR4/4)黏土,见钙质结核		50	276.5	281.8	深红灰色(5YR4/2)含粉砂质黏土
	4	21	21.65	深棕色(7.5YR3/4)黏土,大量螺、蚌类化石		51	281.8	287	灰棕色(10YR5/2)粉砂质黏土
	5	21.65	26.48	棕色(7.5YR4/4)砂质黏土		52	287	291.8	灰棕色(10YR5/2)黏土夹粉砂质黏土
	6	26.48	37.39	棕色(7.5YR4/4)粉砂、细砂夹黏土		53	291.8	300.2	灰色(5YR5/1)粉砂质黏土
	7	37.39	41.09	棕色(7.5YR4/3)黏土夹细砂		54	300.2	305.5	深红灰色(5YR4/2)黏土
	8	41.09	45.18	深棕色(7.5YR4/4)粉砂夹黏土		55	305.5	310	棕色(7.5YR5/3)黏土
	9	45.18	49.79	棕色(7.5YR4/4)砂质黏土夹棕色粉砂		56	310	347.45	棕色(7.5YR4/2)黏土夹中砂
	10	49.79	57	棕色(7.5YR4/3)粉砂夹黏土		57	347.45	379	灰棕色(5YR5/2)黏土夹细砂
	11	57	64.3	红棕色(5YR4/4)黏土		58	379	399.3	棕色(10YR4/3)黏土夹粉砂
	12	64.3	72.7	亮棕色(7.5YR5/6)粉砂		59	399.3	400.8	浅绿棕色(2.5Y5/4)黏土夹薄层粉砂
	13	72.7	76.95	棕色(7.5YR4/4)粉砂夹砂质黏土		60	400.8	416	深灰色(7.5YR4/1)黏土与粉砂互层
	14	76.95	83.2	红棕色(5YR4/4)黏土夹2层粉砂		61	416	461.92	棕色(7.5YR5/3)黏土夹中厚层粉砂
	15	83.2	92	亮棕色(7.5YR4/6)黏土		62	461.92	489.47	灰棕色(10YR4/2)黏土、粉砂夹细砂
	16	92	103.17	深棕色(7.5YR3/3)粉砂		63	489.47	497	棕色(10YR5/3)粉砂、细砂夹黏土
	17	103.17	106.21	红棕色(5YR4/4)砂质黏土,碳质斑点		64	497	507.25	棕色(7.5YR4/3)黏土,见钙质斑点
	18	106.21	110.21	棕色(7.5YR4/3)黏土		65	507.25	511	绿棕色(2.5Y4/3)黏土,见蚌类化石
木瓜组	19	110.21	112.09	红棕色(5YR4/4)含砾砂质黏土	66	511	517	灰绿色(5GY5/2)黏土,呈小碎块状	
	20	112.09	113.45	深棕色(7.5YR3/4)黏土,向下变粗	67	517	529.5	灰绿色(5GY5/2)黏土夹薄层粉砂	
	21	113.45	114.87	亮棕色(7.5YR4/6)细砂,向上变细	68	529.5	539	灰绿色(5GY5/2)黏土	
	22	114.87	120.36	棕色(7.5YR4/4)黏土夹粉砂中层	69	539	545.07	灰绿色(5GY5/2)黏土夹泥砾层	
	23	120.36	123.6	棕色(7.5YR4/4)粉砂、细砂	70	545.07	552	灰橄榄绿色(10Y5/2)黏土,质地较硬	
	24	123.6	127.5	棕色(7.5YR5/4)黏土夹粉砂,水平层理	71	552	555	灰绿色(5GY5/2)黏土	
	25	127.5	131.43	棕色(7.5YR4/3)粉砂,发育水平层理	72	555	563	灰橄榄绿色(10Y5/2)黏土	
	26	131.43	138.96	灰色(10YR3/1)黏土,向下变为深灰色	73	563	576.32	灰绿色(5GY5/2)黏土	
	27	138.96	145	深灰绿色(2.5YR3/3)黏土	74	576.32	584	灰绿色(5GY5/2)黏土,质地坚硬	
	28	145	149	灰棕色(10YR4/2)黏土,贝类化石	75	584	594.3	红棕色(2.5YR4/3)砂质黏土	
	29	149	156.99	深灰棕色(10YR4/2)黏土,水平层理	76	594.3	612	红棕色(2.5YR4/4)砂质黏土夹粉砂	
	30	156.99	166	棕色(10YR4/3)黏土,局部含砂质成分	77	612	615.65	灰绿色(5GR5/2)黏土	
	31	166	172.3	黄棕色(7.5YR5/6)砂质黏土	78	615.65	622	红棕色(5YR4/3)粉砂质黏土	
	32	172.3	182	棕色(7.5YR5/4)粉砂,蚌类化石碎片	79	622	635	红棕色(5YR4/3)黏土	
大沟组	33	182	183.75	深红棕色(5YR2.5/2)黏土,蚌类化石碎片	80	635	644.25	红棕色(5YR5/3)粉砂夹粉砂质黏土	
	34	183.75	186.9	棕色(7.5YR4/3)黏土,蚌类化石碎片	81	644.25	653.5	黄红色(5YR5/6)粉砂夹细砂、黏土	
	35	186.9	192.78	亮棕色(7.5YR5/6)细砂与黏土互层	82	653.5	663	黄红色(5YR4/6)粉砂夹黏土	
	36	192.78	198.4	棕色(7.5YR5/3)黏土夹厚层粉砂	83	663	674	黄红色(5YR5/6)黏土质粉砂	
	37	198.4	200.92	棕色(7.5YR4/2)粉砂,水平层理	84	674	682	红棕色(5YR5/3)黏土质细砂、细砂、砾石	
	38	200.92	206.44	棕色(7.5YR5/3)黏土,化石碎片	85	682	694	红棕色(5YR4/3)黏土质细砂夹黏土	
	39	206.44	211	深灰棕色(10YR4/2)粉砂与黏土互层	86	694	704	棕色(7.5YR5/4)细砂	
	40	211	215	棕色(7.5YR5/4)粉砂与黏土互层	87	704	737.95	棕色(7.5YR5/4)黏土质细砂夹黏土质粉砂	
	41	215	221	棕色(7.5YR5/3)黏土,上部为细砂	88	737.95	776.56	棕色(7.5YR5/4)黏土质粉砂,偶见砾石	
	42	221	228.3	棕色(7.5YR4/3)砂质黏土	89	776.56	785.72	红棕色(5YR5/4)砂质黏土夹细砂、砾石	
	43	228.3	237	棕色(7.5YR4/3)黏土夹中厚层细砂	90	785.72	838.69	黄棕色(10YR5/4)细砂夹粉砂,偶见砾石	
	44	237	241.13	棕色(7.5YR5/4)粉细砂,上部见泥砾	91	838.69	839.5	砾石层,砾石呈次圆状,大小4~12 cm	
	45	241.13	244	棕色(7.5YR5/4)黏土,偶见砾石	92	839.5	850.5	浅棕色(7.5YR6/4)细一中砂与砂砾石互层	
	46	244	250.62	棕色(7.5YR5/3)黏土	93	850.5	853.5	浅棕色(7.5YR6/4)含砾粉砂	
	47	250.62	263.8	棕色(7.5YR4/3)粉砂夹砂质黏土	三叠系	853.5	870.5	灰绿色、暗紫红色泥岩、灰黄色砂岩	

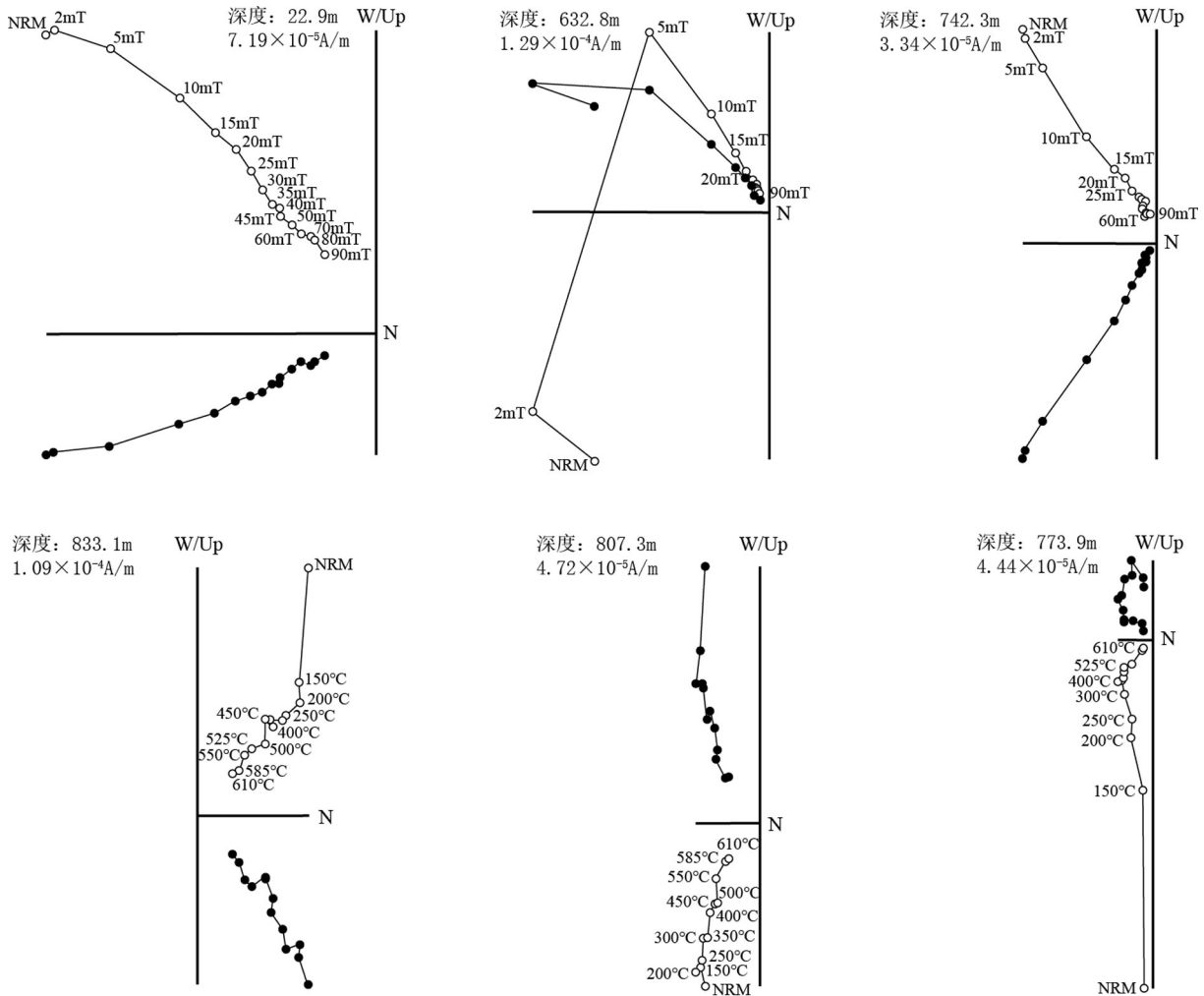


图2 ZK01孔代表性样品交变退磁(第一排)、热退磁(第二排)正交矢量投影图
空心圆代表垂直面投影,实心圆代表水平面投影;NRM为天然剩磁

Fig.2 Orthogonal diagrams of alternating-field demagnetization (1st row) and thermal demagnetization (2nd row) of representative samples from ZK01

The open and solid circles represent projections on vertical and horizontal planes, respectively. NRM for natural remnant magnetization

段表示,作为划分极性事件的参考。由此将ZK01孔的磁极性序列划分为25个磁极性区间(图3),包含13个正向极性段(N1~N13)和12个反向极性段(R1~R12)。与地磁极性年表(GPTS2012)(Cande and Kent, 1995; 肖国桥等, 2010)对比,N1为稳定的长正极性时,与布容正极性时(C1n)一致;R1~R3夹有一长一短两个正极性时N2和N3,其特征与C2n和C2r.1n较为吻合;N4~N6包含2个短反极性时,并夹于R3和R6两个长反极性时之间,与C2An.1n~C2An.3n一致;N7~N10以正、反极性长度大致均等为特征,与C3n.1n~C3n.4n较为吻合,但由于C3n.4n与C3An.1n之间为一较长的反极性

时,所以将N9与C3n.4n对应;N10和N11分别与C3An.1n和C3An.2n对应;N12和N13表现为以正极性时为主,内部包含多个极短的保留反极性时,与C3Bn~C4n.2n特征相似。综合以上分析,认为ZK01钻孔揭露的晚新生代地层开始于约8.1 Ma;中新统与上新统界线位于R9反极性时内部,埋深约580 m;第四系底界位于R3和N4分界处,深度约260 m;布容正极性时与松山反极性时界线位于N1和R1的分界处,埋深约110 m。

5.2 时代界面讨论

以磁性地层为主导,结合岩性地层特征和测井结果(图3),对晋中盆地ZK01孔地层时代界面进行

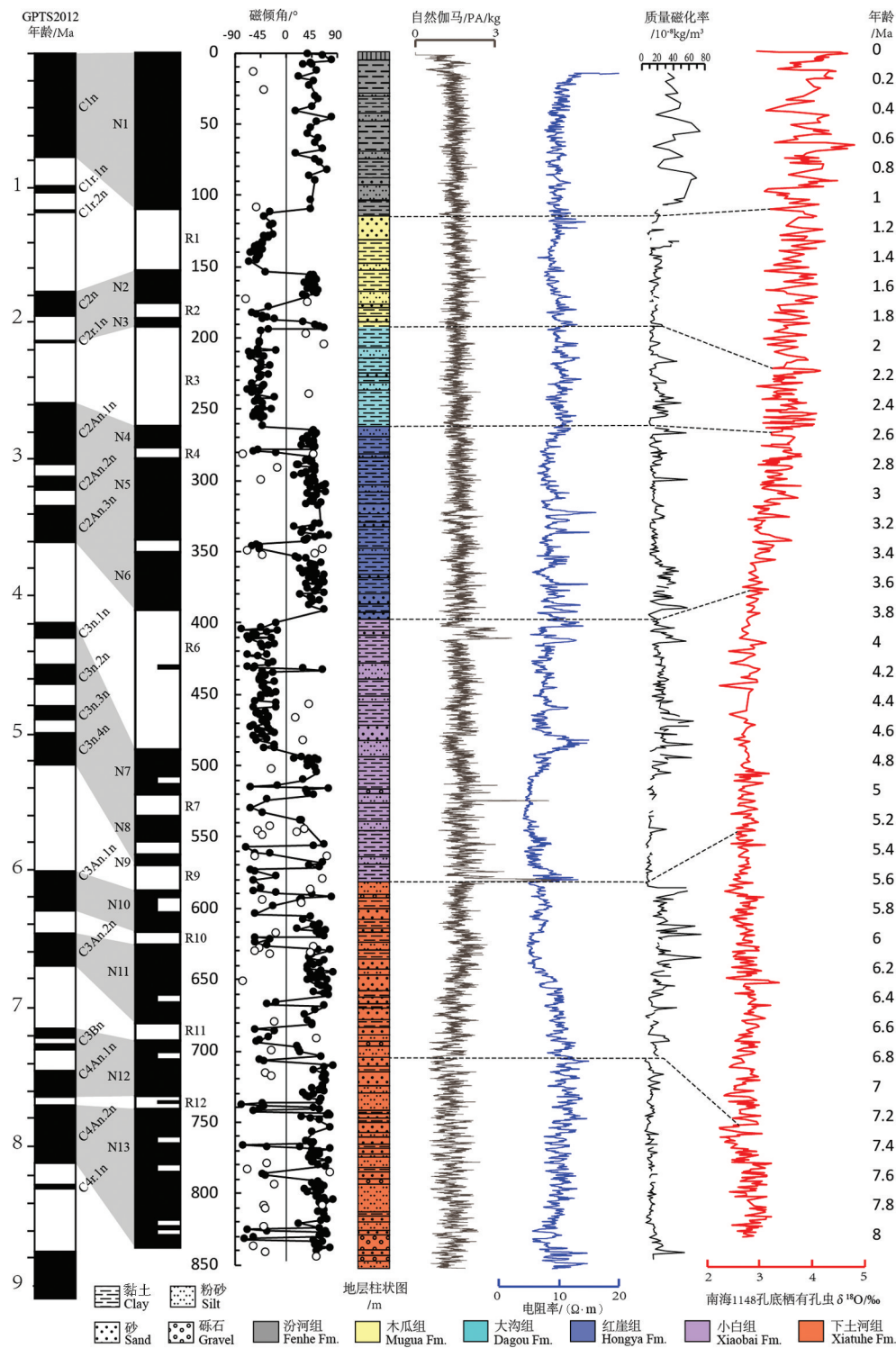


图3 ZK01孔磁性地层和测井曲线与南海1148孔有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ (据Cheng et al., 2006)对比
空心圆为不连续的单个极性样品;极性段由至少连续3个相同极性样品确定;半宽极性段为连续2个相同极性样品所确定
Fig.3 Magnetostratigraphic and well logs of ZK01 and correlations with oxygen isotope records of benthic foraminifera from borehole 1148 in the South China Sea (after Cheng et al., 2006)

Open circle represents single discontinuous polarity sample;Polarity bands are confirmed by at least 3 continuous samples of same polarity;
The half-length polarity band is confirmed by 2 continuous samples of same polarity

初步讨论。

(1)晚新生代地层底界的确定:由古地磁测试结果推测,钻孔新生界底界年龄约为8.1 Ma。钻孔中最下部为砂砾石层(下土河组一段),厚度为149.5 m,不整合覆盖于上三叠统延长组之上。砂砾石层中砾石成分单一,主要为灰白色中粗粒长石石英砂岩,与下伏三叠系岩性一致,为盆地基底风化剥蚀的产物。该砾石层在盆地东部边缘太谷县盘道、下土河一带也有出露,层位与山西吕梁山区广泛分布的保德组基本相当。保德组形成的起始年龄主要为10~8 Ma(岳乐平等, 2004; 刘运明等, 2007; 徐永等, 2013, 2016, 2019; 刘运明, 2017; 邓涛等, 2019),与钻孔得到的晋中盆地新生代沉积地层的底界年龄相符,反映晋中盆地的初始演化时间为8.1 Ma或更早。

(2)中新统和上新统界线的确定:上新统底界位于古地磁 Chron C3r 上部,年龄为5.333 Ma(邓涛等, 2019)。因此将上新统地层的底界定于约584 m处,界线年龄为5.3 Ma。该界线处恰好为下土河组二段和小白组的分界线,界面截然,岩性突变(图4左)。下部下土河组二段岩性以颜色红、颗粒粗、砂泥混杂的河流相沉积为特征;上部小白组岩性以颜色灰绿、颗粒细、钙质成分高、含蚌、螺类化石为特征,属典型深水湖相沉积,小白组也是钻孔中含蚌、螺类化石的最下部层位。该界线在测井曲线和磁化率曲线上也有显著变化。伽马曲线在界线处突然增大,反映黏土含量增加,由早期陆上河流沉积开始转变为湖相沉积。电阻率曲线在界线底部急

剧增大又迅速减小,并总体表现为比下伏地层电阻率更小,反映沉积物粒度减小,孔隙度和含水量减小。磁化率也在界线附近表现出突然降低趋势,反映沉积环境发生剧烈转变。

(3)第四系与新近系界线的确定:由古地磁极性倒转序列松山反极性时和高斯正极性时的时间确定,将ZK01孔的第四系底界确定为263.80 m处,界线年龄为2.58 Ma。该界线处为红崖组和大沟组的分界线,界线上下岩性、岩相稍有差异(图4右),下部红崖组顶部岩性为深红棕色黏土夹粉砂;上部大沟组底部岩性为亮棕色细砂夹砂质黏土条带,发育斜层理,显示流水冲刷构造。该界线处电阻率和磁化率均表现为增大特征,反映沉积颗粒增大,沉积环境由河湖相转变为湖相沉积。

(4)中更新统底界面的确定:由古地磁极性倒转序列布容正极性时和松山反极性时的时间确定,其对应孔深为108 m处,界线年龄为0.78 Ma。该界线处上下岩性、岩相差异不大,大致位于木瓜组和汾河组界线处。下部木瓜组顶部岩性为灰棕色、灰绿色黏土,发育水平层理,为湖泊相沉积;汾河组上部为棕色、红棕色黏土,局部含砂质成分,发育铁锈斑点以及炭质斑点。电阻率曲线在汾河组底界有增大趋势,但磁化率在中更新统底界有显著增大特征,同样表明存在两个界线。现按磁性地层特征将中更新统底界确定为108 m处。

(5)古地磁结果未能揭示ZK01孔上更新统底界面和全新统底界面的准确位置。但伽马曲线和电阻率曲线均在15~20 m处发生显著改变,可能指



图4 ZK01孔地层分界处岩性变化特征

Fig.4 Lithologic change characteristics at stratigraphic boundaries of borehole ZK01

示全新统底界。

5.3 综合地层划分

基于磁性地层结果,结合岩石特征,可建立晋中盆地晚新生代以来的年代地层框架(表3)。

区内新生界可划分为新近系和第四系。其中新近系古地磁结果辨识出的正负极性时段与沉积单元的界线存在明显的对应关系,而第四系除底界与新近系的界线较为清楚外,向上沉积单元的界线与古地磁结果辨识出的正负极性时段对应关系较差。

(1) 新近系(N)

中新统(N₁):包括岩石地层下土河组一段和下土河组二段。下土河组一段(853.5~704 m)对应中新统灞河阶(N₁⁴)(8.1~7.25 Ma),下土河组二段对应中新统保德阶(N₁⁵)(7.25~5.3 Ma)(岳乐平等, 2004; 刘运明等, 2007; 徐永等, 2013, 2016, 2019; 刘运明, 2017; 邓涛等, 2019)。底部下土河组一段岩性为砾石层夹浅棕色细—中砂、含砾粉砂,砾石呈次圆状,大小4~12 cm,厚度149.5 m。之上的下土河组二段下部(704~663 m)为红棕色黏土质细砂、细砂,向下砾石逐渐增多;中部(663~644.25 m)黄红色粉砂夹细砂、黏土;上部(644.25~584 m)为红棕色砂质黏土夹粉砂、灰绿色黏土,厚度120 m。中新统总厚269.50 m。

上新统(N₂):包括小白组和红崖组,分别对应上新统高庄阶(N₂¹)(5.3~3.6 Ma)和麻则沟阶(N₂²)(3.6~2.58 Ma)(全国地层委员会, 2017)。小白组下部(584~511 m)为灰绿色、灰橄榄绿色黏土夹薄层粉砂,底部黏土质地坚硬,钙质成分高;上部(511~399.3 m)为浅绿棕色、深灰色、棕色、绿棕色黏土夹薄层、中厚层粉砂、细砂,小白组厚度184.70 m。红崖组下部(399.3~305.5 m)为棕色黏土夹粉砂、细砂、中砂;中部(305.5~281.80 m)为灰棕色、深红灰色黏土、粉砂质黏土;上部(281.80~263.80 m)为深红棕色细砂、深灰棕色黏土夹中厚层粉砂、深红灰色含粉砂质黏土,红崖组厚度135.50 m。上新统总厚320.20 m。

(2) 第四系(Q)

下更新统(Qp¹):包括大沟组和木瓜组,对应更新统泥河湾阶(Qp¹)(2.58~0.78 Ma)(全国地层委员会编, 2017; 邓成龙等, 2019)。大沟组下部(263.80~211 m)为棕色粉砂、粉细砂与黏土、砂质黏土互层;上部(211~182 m)为棕色、深红棕色黏土夹厚层粉砂、细砂,水平层理发育。木瓜组(182~108 m)主要为灰色、深灰绿色、棕色黏土,水平层理发育。下更新统顶界由古地磁极性倒转序列布容正极性时和

表3 ZK01孔综合地层划分及沉积速率变化
Table 3 Integrated stratigraphic division and sedimentary rates change of ZK01

年代地层			磁性地层				岩石地层		沉积速率/(m/Ma)	气候变化				
系	统	阶	GPTS2012			正极性段/m	组(段)	厚度/m						
			极性时	极性亚时	年龄/Ma									
第四系	全新统-中更新统	Qh-Qp ²	C1	C1n	0.000	0.781	N1(0~108)	汾河组	108	138.5	干旱			
				下更新统	Qp ¹	C2	C2n	1.778	1.945	N2(154~172)	木瓜组	74	86.56	湿润
	C2r.1n	2.140	2.150				N3(188~193)	大沟组	81.8					
	新近系	上新统	N ₂ ²	C2	C2An.1n	2.581	3.032	N4(264~278)	红崖组	135.5	132.8	干旱		
C2An.2n					3.116	3.207	N5(283~344)	湿润						
C2An.3n					3.330	3.596	N6(353~399)	小白组				184.7	106.8	干旱
C3n.1n					4.187	4.300	N7(492~514)							湿润
中新统		N ₁ ⁵	C3	C3n.2n	4.493	4.631	N7(515~521)	下土河组	120	62.5	干旱			
				C3n.3n	4.799	4.896	N8(538~557)				湿润			
				C3n.4n	4.997	5.235	N9(568~571)				二段	120	62.5	干旱
				C3An.1n	6.033	6.252	N10(584~620)							湿润
中新统	N ₁ ⁴	C4	C3An.2n	6.436	6.733	N11(629~682)	一段	149.5	175.9	干旱				
			C3Bn	7.140	7.285	N12(696~704)								
				C4n.1n	7.454	7.642	N12(704~736)							
				C4n.2n	7.695	8.108	N13(740~853)							

松山反极性时的时间,对应孔深为108 m处,上下岩性、岩相差异不大,为棕色、红棕色黏土,局部含砂质成分。下更新统总厚155.80 m。

中、上更新统一全新统(Qp²⁻³—Qh):为汾河组,厚度108 m,对应于布容正极性时,岩性、岩相差异不大,未能进一步细分。

6 讨 论

对沉积物年代和沉积过程的研究,可以较好地认识构造-气候旋回对区域地质环境演化过程的影响,高分辨率的沉积速率对反映构造活动性和气候特征有重要的指示意义。盆地沉积速率的变化与沉积物类型、构造活动阶段以及气候密切相关,某一时段的沉积速率可能主要受控于某一个影响因素,也可能为各个因素相互作用的结果。根据ZK01孔各地层组的厚度和年龄,计算了该孔的时深转换与沉积速率曲线(表3,图5),根据沉积速率变化,结合磁性地层学、沉积物特征,对ZK01孔揭示的晋中盆地构造活动及沉积环境演化进行讨论。

6.1 构造活动演化

中生代末至中新世中期,是地壳运动稳定阶段,包括山西中西部地区在内的鄂尔多斯高原东缘总体处于区域性隆升的状态,以剥蚀、夷平过程为主,本区及邻区普遍缺失古近纪和新近纪中新世早中期沉积(王乃樑等,1996;魏荣珠等,2017)。

中新世晚期,吕梁山山体快速隆升(徐永等,2016),山西中部汾渭断陷盆地开始活动。8.1~7.25 Ma期间,本区沉积ZK01孔下土河组一段,该段埋深853.5~704 m,沉积速率约为175.9 m/Ma,为盆地沉积速率最高的阶段。下土河组一段底部沉积物为冲积或洪积相砾石层,向上变细至粉砂和黏土质粉砂互层,反映断陷初期陆上河流系统碎屑沉积物的快速堆积。

中新世末期,7.25~5.33 Ma期间,下土河组二段埋深584~704 m,沉积速率约62.5 m/Ma,为盆地沉积速率最低的阶段。该段沉积物以冲、洪积相的粉砂质黏土和黏土质粉砂为主,沉积物粒度较细,上部已出现少量湖泊相的灰绿色黏土,说明当时晋中盆地已开始出现湖泊。该时期沉积速率低,沉积物粒度细,为盆地加速沉降阶段。

上新世期间沉积速率相对平稳。上新世早期

沉积速率约106.8 m/Ma,小白组(584~399.3 m)沉积物以深水湖相的灰绿色、灰橄榄绿色黏土为主,表明在此期间,构造运动活跃,盆地快速下沉,沉积物不能补偿新产生的盆地空间,因而发育大规模的湖泊。上新世晚期的红崖组以河流相沉积为主,间夹湖相沉积,沉积速率约132.8 m/Ma,为盆地稳定沉降阶段。

早更新世期间沉积速率约86.56 m/Ma,相对较低。早更新世早期,大沟组为河流相、湖相相间沉积;木瓜组为灰色、深灰绿色、深灰棕色黏土,水平层理发育。早更新世中晚期是盆地中又一次湖泊大规模发育的时期,表明构造运动活跃,盆地下沉较快。

早更新世晚期之后,都是湖泊发育的时期,有时水面下降,地形较高部位露出水面,形成汾河组河湖相间的沉积,沉积速率约138.5 m/Ma,为盆地稳定沉降阶段。

6.2 前全新世气候环境变化

气候变化深刻的影响和控制着沉积物的风化、剥蚀、搬运和沉积过程(邓成龙等,2019),沉积物作为地表作用和气候作用的产物,其颜色、粒度、沉积速率以及磁化率特征,记录了地表作用过程和气候演化信息。

沉积物磁化率主要取决于沉积物中磁铁矿的含量,而磁铁矿含量的变化主要受物源和气候影响,湿热气候更有利于磁铁矿被氧化成磁化率值更低的赤铁矿(田明中和程捷,2009)。ZK01孔沉积物磁化率特征显示(图3),古气候在7.80~6.64 Ma、5.40~4.35 Ma、3.40~2.79 Ma和2.26~0.85 Ma阶段比较湿润,其余时期气候较干旱。湿润阶段大致与盆地中湖泊发育时期对应,沉积物一般颜色偏灰绿色,粒度较细,沉积速率相对较低,磁化率平均值低,在 $10.97 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3 \sim 18.17 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。干旱阶段以河流相沉积为主,沉积物颜色偏棕红色,粒度较粗,沉积速率相对较高,磁化率平均值较高,在 $20.65 \times 10^{-8} \sim 50.05 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。

本区气候变化和8Ma以来的南海底栖有孔虫氧同位素曲线(汪品先等,2003;Cheng et al., 2006)有较好的对应关系(图3)。通过与深海氧同位素值对比,可以判断区域沉积环境变化与更大尺度甚至与全球的气候变化是否相协调,对探讨区域构造作

用与气候变化的关系有重要的启发作用。底栖有孔虫氧同位素值主要受控于全球冰量的变化,与海水温度成反比,氧同位素值降低代表温暖气候,氧同位素值升高代表寒冷气候(Shackleton, 1967; Mix and Ruddiman, 1984)。从曲线变化趋势来看,8 Ma以来 ^{18}O 值总体增大,反映气候是总体趋于变冷。其中,4 Ma以前有两次变暖事件,分别是在7.6 Ma和5.8 Ma左右,这两次气候变暖对应着本区沉积环境两次较大的转变,分别是陆上河流相(下土河组一段)转变为三角洲-滨浅湖相的过渡相(下土河组二段),再转变为深湖相(小白组),5.3 Ma附近的磁化率值的突然降低也验证了该时期气候变湿热。3.8 Ma开始 ^{18}O 值逐渐增大,波动幅度也显著增大,反映气候逐渐变冷,气候异常波动增加,与北极冰盖的形成密切相关(Zachos et al., 2001; Gradstein et al., 2012),开始了冰期和间冰期旋回,这一变冷事件与小白组和红崖组的转变相对应,表现为湖泊萎缩。第四纪以来,更新世期间冰期-间冰期交替发育,相对应的沉积也以河湖相共存,湖进河退和湖退河进为主要演化过程。从约1.2 Ma开始,氧同位素值和磁化率值波动幅度再次同步增大,冰期和间冰期旋回特征更加显著。

6.3 全新世以来气候环境变化与人类活动关系讨论

进入新世纪,人地关系的研究越来越得到重视。本文依据在ZK01钻孔中汾河组上部岩性、化石特征及取得的6个 ^{14}C 样品年龄数据,结合前人研究成果和史籍资料,对全新世(中晚期)以来气候变迁、盆地中湖泊演化及其与人类活动关系进行初步探讨。

6.3.1 汾河组上部沉积特征

ZK01孔汾河组上部为河湖相沉积,岩性为棕色黏土、亚砂土、砂质黏土夹粉砂、细砂。在汾河组上部的黏土层中,采集了6块样品在中国地质大学(武汉)地质调查实验中心进行了 ^{14}C 测年。 ^{14}C 测年原理为:将样品中的碳酸盐沉淀在高真空系统上,先用浓 H_3PO_4 酸解出 CO_2 ,然后将 CO_2 与高纯金属Li反应,生成 Li_2C_2 ,接着进行碳化锂水解生成 C_2H_2 ,最后将高纯乙炔合成苯。取出苯,加入适量闪烁液,使用超低本底液体闪烁能谱仪测试 ^{14}C 放射性活度,从而获得样品的现代碳百分数含量,用于 ^{14}C 年龄计算。测试结果见表4。

沉积特征显示,ZK01孔在21 m处岩性变化较大,21 m之下岩性为棕色黏土、砂质黏土,含黑色炭质成分,21~22 m为化石富集层,主要见有完整的白小旋螺(*Gyraulus albus*)和大量蚌类化石碎片,也是钻孔中含蚌、螺类化石的最上部层位。21 m之上岩性为黏土、亚砂土,含灰白色钙质结核,大小为3~7 mm。该界线处 ^{14}C 年龄显示为先秦时期,可能为湖水覆盖的最晚时期,湖沼消失后形成蚌、螺类化石富集层,之后湖水再未覆盖钻孔所处位置。

6.3.2 气候变迁和湖泊演化

全新世气候变化频繁,主要体现在温度和降水量的变化上(竺可桢,1972),盆地中湖泊时消时复,总的趋势是逐渐缩小、湮塞,最终完全消失(王尚义,1997;孟万忠,2011)(表4)。

早全新世时,距今约7500年前,气候回暖。距今约7500~3000年间,气候温暖湿润,年均气温比现在在偏高 2°C 以上,年降水量比现在多200 mm以上。

晚全新世以来,全球气候曾发生几次大的变化,突出表现在冷暖、干湿的变化上。距今约3000~2500年间的周代,是气候比较寒冷干燥的时期,气候逐渐干凉。距今2500~2000年间的春秋时期,是一个比较温暖湿润的时期,昭余祁古湖湖面广阔(图6),水量丰富,湖面面积达 1800 km^2 。公元初到6世纪又是气候寒冷期,年平均气温比现在低 $2\sim 3^\circ\text{C}$,盆地中残存的昭余祁古湖逐渐被分割为“九泽”,湖面缩小,湖面面积约 700 km^2 ,为北魏时期郛泽和祁蕤的范围。隋唐时代是气候比较温暖的时期,文湖的兴盛,以及隋唐开始的大规模水利灌溉工程的修建,说明了这一时期水量丰富,湖面面积约 500 km^2 。北宋至辽金时期,公元10—12世纪又是气候寒冷期,气候寒冷,气温比现在低 1°C ,文湖时废时复,说明当时湖泊的水量已难以维持文湖的存续,文湖实际上已成为一个雨季泄洪的低洼地区。公元13世纪的元代,气候比较温暖,原昭余祁古湖的旧址,浚水为昭余池,面积约 50 km^2 。明清时期,气候进入寒冷期,气候干冷,盆地中的湖泊基本上消亡殆尽。

6.3.3 人类活动影响

汾渭断陷盆地是华北地区重要的板内构造变形区,是地质历史上最新的构造单元,从新生代新近纪中新世晚期开始活动,上新世逐渐成型,第

表4 晋中盆地全新世以来气候变迁和湖泊演化

Table 4 Climate change and lake evolution of Jinzhong Basin in Holocene

主要时代	距今/年	气候变化	湖泊面积/km ²	¹⁴ C 样品	
				埋深/m	年龄/ka B.P.
明、清—	600~	寒冷干燥			
元	750~600	温暖湿润	50		
宋	1000~750	气候寒冷	300	4.5	0.770±0.34
隋唐	1500~1000	温暖湿润	500	6	1.620±0.36
秦—北魏	2000~1500	气候寒冷	700	7.8	2.080±0.37
春秋	2500~2000	温暖湿润	1800	8.8	2.450±0.38
周	3000~2500	寒冷干燥		18.25	2.730±0.38
史前	7500~3000	温暖湿润	>2000	21.35	2.780±0.38
早全新世	7500年前	气候回暖			

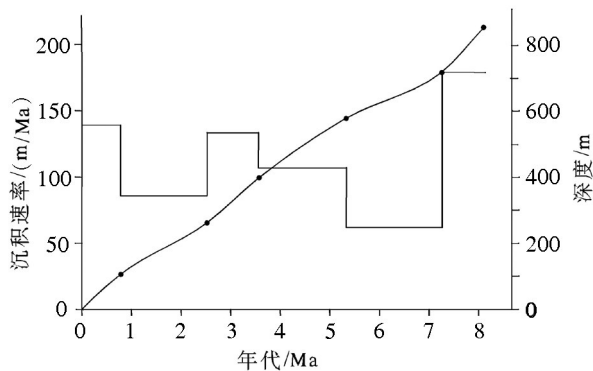


图5 ZK01孔年代-深度曲线与沉积速率变化
Fig.5 Variations of age-depth and sedimentation rates of ZK01 borehole

四纪以来基本形成现在的构造地貌格局。人类起源目前多数人认为从300万年开始活动,因此盆地的形成,为人类的出现和活动提供了适合生存的空间,第四纪地质与人类活动的关系最为密切,汾渭盆地被认为是中华民族重要的发祥地之一。

从考古学角度看,旧石器时代基本对应更新世,新石器时代对应全新世(张之恒,2009)。考古发掘文化遗存显示(山西省文物局,2006):更新世时,晋中盆地基本为湖泊所覆盖,盆地周边旧石器时代人类遗存较少,目前只发现有13处,所处的海拔高度在1300 m左右。新石器时代,人类文化遗存177处,主要属仰韶文化和龙山文化时期,所处的海拔高度降低到1000 m左右,说明全新世时,晋中盆地中湖泊进一步缩小,人类的活动足迹逐渐从盆地边缘丘陵地带向平缓的冲积平原地带开拓。夏、商、周时期的193处人类遗存,分布高度逐渐下降到

海拔900 m左右,人类活动足迹已对盆地中残存的湖泊形成了包围态势,进一步向盆地的腹地发展。进入历史时期,人口增加,农业生产、毁林开荒造成植被破坏及水土流失,河流中泥沙含量增大,昭余祁及其残留湖泊逐渐缩小、湮塞,现在,晋中盆地中湖泊完全消失,虽然主要县城仍分布在盆地的周边(图1,图6),但整个盆地已成为山西省人口最为密集的地区。

在晋中盆地全新世以来河湖变迁过程中,自然与人文因素共同发挥作用。前期,气候等自然因素起决定作用;后期,人文因素作用加强,一定程度上超越了自然因素的作用,对局部环境的影响甚至是决定性作用。

综上所述,构造活动与气候变化是盆地沉积环境的主要控制因素。在盆地强烈断陷下沉阶段,如中新世晚期的快速堆积、上新世早期和早更新世湖泊的大规模发育时期,构造活动占主导作用,沉积速率的变化直接反映了盆地沉降的幅度。在构造活动相对平稳期,盆地的沉积环境演化深刻地受到气候变化的影响,气候变暖带来充沛降雨,使盆地湖面升高,河流后退;气候变冷伴随着湖泊萎缩,河流进积发育。全新世时期,早中期即先秦(约2.5 ka)以前,盆地中仍是河湖共存阶段;晚期(2.5 ka以来),出现湖消河长的局面,直至明、清时期湖泊全部消失,气候变化和人类活动影响是盆地中湖泊最终消失的主要原因。

7 结论

(1) 晋中盆地 ZK01 孔深 870.5 m, 晚新生代沉

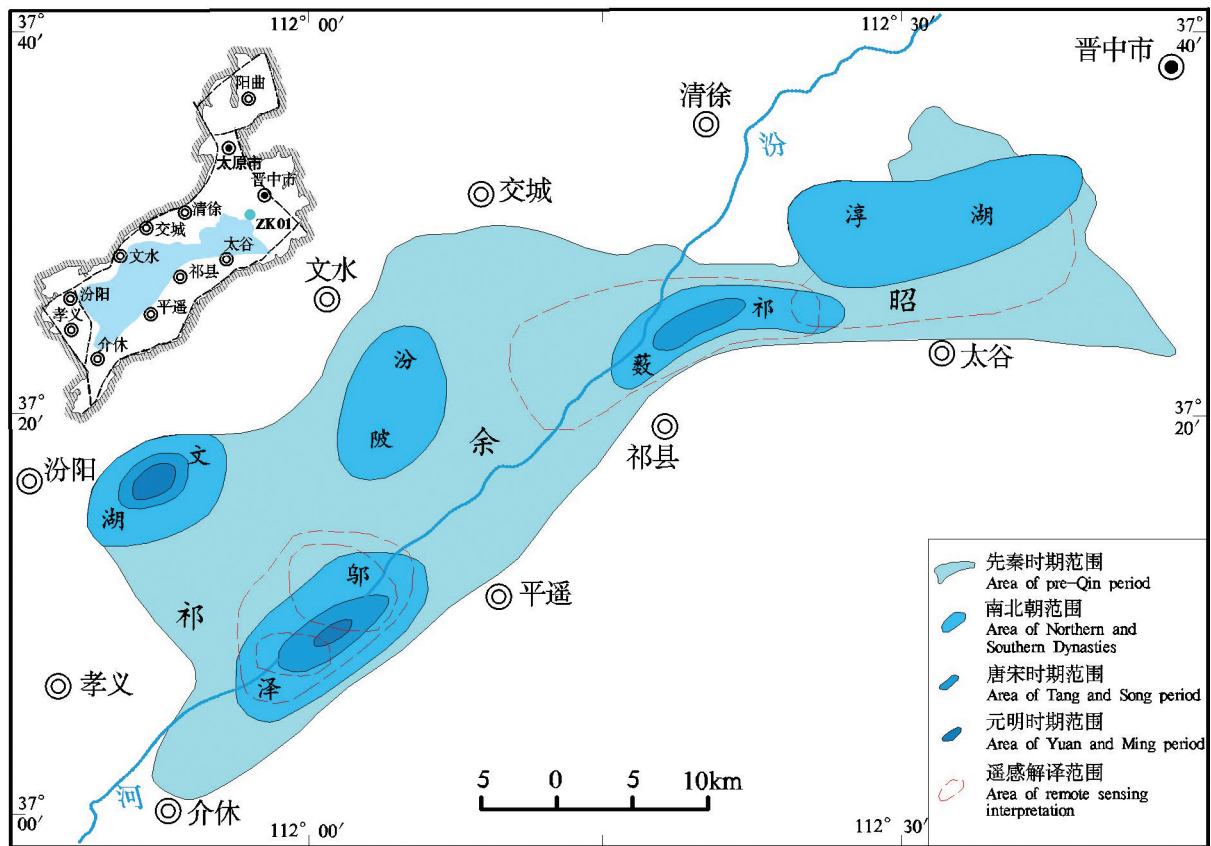


图6 晋中盆地湖泊变迁湮塞示意图(据王尚义,1997;孟万忠,2011改编)

Fig 6 Sketch map of the vicissitudes and silting of lakes in Jinzhong Basin (modified from Wang Shangyi, 1997; Meng Wanzhong, 2011)

积物划分为93个沉积层,6个岩性组(段)。首次通过高分辨率磁性地层学研究,建立了ZK01孔地层年代框架,划分出13个正极性时段和12个负极性时段,晚新生代地层底界年龄为8.1 Ma。结合岩石地层特征,将ZK01孔地层划分为新近系中新统灞河阶(N_1^4)(853.50~704 m)和保德阶(N_1^5)(704~584 m),上新统高压阶(N_2^1)(584~399.30 m)和麻则沟阶(N_2^2)(399.30~263.80 m),第四系下更新统泥河湾阶(Qp^1)(263.80~108 m),中、上更新统和全新统(108~0 m)。

(2)ZK01孔的古地磁极性带分界与重要的岩性界面基本吻合的现象,反映了晚新生代以来古地磁场的变化和沉积物岩性变化之间的一些联系。ZK01孔可作为晋中盆地及邻区一个参照剖面,对汾渭断陷盆地晚新生代地层划分和对比、活动断裂研究、构造单元划分、古地理环境演变研究提供重要参考。

(3)基于磁性地层年代标尺,根据沉积速率变化,结合沉积物颜色、粒度以及磁化率特征,对ZK01孔揭示的晋中盆地构造活动及沉积环境演化进行了讨论。认为构造活动与气候变化是盆地沉积环境的主要控制因素。在盆地强烈断陷下沉阶段,构造活动占主导作用;在构造活动相对平稳期,盆地中沉积环境变化与全球气候突变事件可进行良好对比,沉积环境可能主要受控于气候变化影响。上新世早期和早更新世中晚期是两次湖泊大规模发育的时期,以上新世早期湖泊规模最大。

(4)对全新世以来气候变迁、湖泊演化与人类活动关系进行了初步探讨。认为在河湖变迁过程中,先秦(约2.5 ka)以前,气候等自然因素起决定作用,盆地中仍是河湖共存阶段;后期(2.5 ka以来),人口增加,农业生产、毁林开荒造成植被破坏及水土流失,河流中泥沙含量增大,残留湖泊逐渐缩小、湮塞,出现湖消河长的局面,直至明、清时期湖泊全

部消失。气候变化和人类活动影响是盆地中湖泊最终消失的主要原因。

致谢:与中国科学院地质与地球物理研究所郝青振研究员、谭程鹏博士、中国地质调查局天津地质调查中心胥勤勉高级工程师进行了有益的讨论;项目组杨鹏生、郝卫东、胡霄等一起参与野外编录、取样、测井工作;审稿专家和编辑老师对本文的修改提出了大量有益的建议,在此一并表示感谢。

References

- Cande Steven, Kent Dennis. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B4): 6093–6095.
- Cao Jiabin, Wang Nailiang, Cui Haiting, Cui Zhijiu, Cui Jicheng, Liu Xinwu. 1980. A preliminary study on the Late Cenozoic stratigraphy and sedimentary environment in the Wuxing Area of Yushe, Taigu, Shanxi[J]. *Quaternary Sciences*, 5(1): 77–86(in Chinese).
- Chen Guoda. 1984. Tectonic nature of Fen–Wei graben—a rift type geodepression system[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 8(4): 319–326(in Chinese).
- Cheng Xinrong, Zhao Quanhong, Wang Jiliang, Jian Zhimin, Xia Peifen, Huang Baoqi, Fang Dianyong, Xu Jian, Zhou Zhen, Wang Pinxian. 2006. Data report: Stable Isotopes from Sites 1147 and 1148[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, 184: 1–12.
- Deng Chenglong, Hao Qingzhen, Guo Zhengtang, Zhu Rixiang. 2019. Quaternary integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 49(1): 330–352 (in Chinese with English abstract).
- Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin, Zhu Rixiang. 2007. Environmental magnetism of Chinese loess paleosequences [J]. *Quaternary Sciences*, 27(2): 193–209 (in Chinese with English abstract).
- Deng Tao, Hou Sukuan Wang Shiqi. 2019. Neogene integrative stratigraphy and time scale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 49(1): 319–333 (in Chinese with English abstract).
- Gradstein Felix M, Ogg James George, Schmitz Mark, Ogg Gabi M. 2012. *The Geological Time Scale 2012*[M]. Amsterdam: Elsevier, 949.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, Wu H B, Qiao Y S, Zhu R X, Peng S Z, Wei J J, Yuan B Y, Liu T S. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. *Nature*, 416: 159–163.
- Li Qingwu. 2005. Numerical modeling of present tectonic stress field of Shanxi graben system[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 12(2): 247–262 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jinfeng, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, Peng Shuzhen, Qiao Yansong, Sun Bin, Ge Junyi. 2005. Magnetostratigraphy of the Miziwan Miocene eolian deposits in Qin’an county (Gansu Province) [J]. *Quaternary Sciences*, 25(4): 503–509(in Chinese with English abstract).
- Liu Suowang, Gan Jiasi. 1981. The system of Fenwei rift[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, (3): 110–123(in Chinese).
- Liu Yunming, Li Youli, Lü Honghua, Si Supei, Zhao Hongzhuang. 2007. Preliminary study of Alluvial pebbles on high terraces of the Yellow River from Baode to Kehu in Shanxi–Shaanxi Gorge[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(6): 808–815(in Chinese with English abstract).
- Liu Yunming. 2017. Magnetostratigraphy and origin of Neogene conglomerate in Hequ, Shanxi Province[J]. *Quaternary Sciences*, 37(3): 597–611(in Chinese with English abstract).
- Meng Wanzhong. 2011. Study on the Changes of Rivers and Lakes in the Middle Reaches of Fenhe River in Historical Period[D]. Xi’an: Shaanxi Normal University, 165–171(in Chinese with English abstract).
- Miao Weidong, Li Shijie, Fen Jinshun, Gao Li, E Jian. 2016. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. *Geology in China*, 43(6): 2022–2035(in Chinese with English abstract).
- Mix A C, Ruddiman W F. 1984. Oxygen isotope analyses and Pleistocene ice volumes[J]. *Quaternary Research*, 21(1): 1–20.
- National Commission of Stratigraphy. 2017. *Guide to Stratigraphy in China and the Introduction to the Guide*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 28–29(in Chinese).
- Opdyke N D, Channell J E. 1996. *Magnetic Stratigraphy*[M]. SanDiego, California: Academic Press.
- Petroleum Survey and Exploration Team of Shanxi Geological Bureau. 1979. Oil Survey and Evaluation Report of Jinzhong Fault Depression[R] (in Chinese).
- Roger G Walker. 1984. *Facies Models, Second Edition*[M]. Canada: Geological Association of Canada Publication.
- Shackleton N J. 1967. Oxygen isotope analyses and pleistocene temperatures re-assessed[J]. *Nature*, 215: 15–17.
- Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. *Regional Geology of Shaanxi Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 315–340(in Chinese).
- Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1997. *Lithostratigraphy of Shanxi Province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 275–318(in Chinese).
- Shanxi Culture Relics Bureau. 2006. *Atlas of Chinese cultural relics Shanxi Volume*[M]. Beijing: Sinomap Press(in Chinese).
- Sun Jiyuan, Xing Jishan, Ye Zhiguang, Chen Changwu. 1992. Intraplate tectonics and deep-seated process in north China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 11(1): 4–19(in Chinese).

- Chinese).
- Tian Mingzhong, Cheng Jie. 2009. Quaternary Geology and Geomorphology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 221–222(in Chinese).
- Wang Hongqiang. 2007. Magnetic properties of lacustrine sediments at the Donggutuo section in the Nihewan basin and their environmental significance[J]. Quaternary Sciences, 27(6): 1081–1091(in Chinese with English abstract).
- Wang Nailiang, Mo Duowen, Yang Jingchun, Mo Duowen, Li Youli, Pan Mao. 1996. Cenozoic Sedimentary and Structural Geomorphology of Shanxi Graben System[M]. Beijing: Science Press: 120–156(in Chinese).
- Wang Pingxian, Zhao Quanhong, Jian Zhimin, Cheng Rongxin, Huang Wei, Tian Jun, Wang Jiliang, Li Qianyu, Li Baohua, Su Xin. 2003. 30 million years of deep sea records in the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 48(21): 2206–2215(in Chinese).
- Wang Shangyi. 1997. The vicissitudes and silting of ancient Zhao–Yu Lake in Taiyuan Basin[J]. Acta Geographical Sinica, 52(3): 262–267(in Chinese with English abstract).
- Wei Rongzhu, Li Haobin, Xu Chaolei, Zhang Zhaoqi, Liu Chengru. 2017. Review on Meso–Cenozoic tectonic evolution in Shanxi uplift[J]. Geological Survey of China, 4(1): 24–34(in Chinese with English abstract).
- Wu Lie, Gong Wangqi, Su Zongzheng, Zhang Xingyuan, Zhao Xinping. 1981. Crustal structure changes and seismic activity in Shanxi Seismic Belt[J]. Earthquake Research in Shanxi, (2): 1–4 (in Chinese).
- Xiao Guoqiao, Zhan Tao, Ge Junyi. 2010. Development of the geomagnetical polarity time scale: A review[J]. Advance in Earth Sciences, 25(4): 365–373(in Chinese with English abstract).
- Xing Zuoyun, Zhao Bin, Tu Meiyi, Xing Jishan. 2005. The formation of the Fenwei rift valley[J]. Earth Science Frontiers, 12(2): 247–262(in Chinese with English abstract).
- Xu Yong, Li Jianxing, Pan Feng, Yue Leping. 2016. The basal ages and deposit process of the red clay in the west piedmont of the Luliang mountains[J]. Quaternary Sciences, 36(5): 1114–1124(in Chinese with English abstract).
- Xu Yong, Tang Yaming, Pan Feng, Li Jianxing, Zhang Rui, Yue Leping. 2019. Palaeomagnetic chronology and its tectonic implications of the red clay in the Wujiamao section in west piedmont of the Luliang Mountains[J]. Quaternary Sciences, 39(2): 328–338(in Chinese with English abstract).
- Xu Yong, Yue Leping, Li Jianxing, Wang Jianqi, Sun Bo, Sun Lu, Zhang Jiayin, Ma Ji. 2013. Magnetostratigraphy of Late Neogene red clays in the Fuxing area of western foothills of the Luliang Mountains[J]. Journal of Stratigraphy, 37(1): 33–40(in Chinese with English abstract).
- Yao Zhengquan, Guo Zhengtang, Chen Yukun, Xiao Guoqiao, Shao Yongxin, Wang Xulong, Hao Qingzhen, Lu Yantao. 2006. Magnetostratigraphy of marine–terrestrial facies deposits in Bohai bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 26(1): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- Yue Leping, Deng Tao, Zhang Yunxiang, Wang Jianqi, Zhang Rui, Yang Lirong. 2004. Magnetostratigraphy of stratotype section of the Baode stage[J]. Journal of Stratigraphy, 28(1): 48–51(in Chinese with English abstract).
- Zachos J S, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 292: 686–693.
- Zhang Chongli. 1993. Characteristics and origin of the vertical deformation in Shanxi graben system, Shanxi Province[J]. Earthquake Research In China, 9(4): 327–333 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shimin. 2006. Basin evolutionary differences and seismotectonics of Fenwei graben system[J]. Journal of Geomechanics, (2): 30–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xilin. 1983. Late Cenozoic palynological assemblage and its Stratigraphic Significance in Jinzhong fault depression, Shanxi Province[C]//Petroleum Geology Anthology(5). Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhang Zhiheng. 2009. General Theory of Chinese Archaeology[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 4–7(in Chinese).
- Zhu Kezhen. 1972. Preliminary research on climate change in China over the past five thousand years[J]. The Chinese Journal of Archaeology, 1: 15–38(in Chinese).
- Zhu R X, Hoffman K A, Potts R, Deng C L, Pan Y X, Guo B, Shi C D, Guo Z T, Yuan B Y, Hou Y M, Huang W W. 2001. Earliest presence of humans in Northeast Asia[J]. Nature, 413: 413–417.
- Zhu Rixiang, Deng Chenglong, Pan Yongxin. 2007. Magnetostratigraphy of the fluvio–lacustrine sequences in the Nihewan basin and its implications for early human colonization of northeast Asia[J]. Quaternary Sciences, 27(6): 922–944(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹家欣, 王乃樑, 崔海亭, 崔之久, 承继成, 刘心务. 1980. 山西太谷榆社武乡一带晚新生代地层与沉积环境的初步研究[J]. 第四纪研究, 5(1): 77–86.
- 陈国达. 1984. 论汾渭地堑的大地构造性质——一个裂谷型地洼系[J]. 大地构造与成矿学, 8(4): 319–326.
- 邓成龙, 郝青振, 郭正堂, 朱日祥. 2019. 中国第四纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49(1): 330–352.
- 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 朱日祥. 2007. 中国黄土环境磁学[J]. 第四纪研究, 27(2): 193–209.
- 邓涛, 侯素宽, 王世骥. 2019. 中国新近纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49(1): 319–333.
- 李清武. 2005. 山西地堑系现今构造应力场的三维数值模拟[J]. 内蒙古石油化工, 12(2): 247–262.

- 刘进峰, 郭正堂, 郝青振, 彭淑贞, 乔彦松, 孙斌, 葛俊逸. 2005. 甘肃秦安糜子湾剖面中新世风尘堆积的磁性地层学研究. 第四纪研究, 25(4): 503-509.
- 刘锁旺, 甘家思. 1981. 汾渭裂谷系[J]. 地壳形变与地震, (3): 110-123.
- 刘运明, 李有利, 吕红华, 司苏沛, 赵洪壮. 2007. 黄河山陕峡谷保德—克虎段高阶地砾石层的初步研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 43(6): 808-815.
- 刘运明. 2017. 山西河曲地区新近纪砾石层的磁性地层年代与成因[J]. 第四纪研究, 37(3): 597-611.
- 孟万忠. 2011. 历史时期汾河中游河湖变迁研究[D]. 西安: 陕西师范大学: 165-171.
- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 高立, 鄂建. 2016. 长江三角洲NB5孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 43(6): 2022-2035.
- 全国地层委员会编. 2017. 中国地层指南及中国地层指南说明书[M]. 北京: 地质出版社, 28-29.
- 山西省地质局石油普查勘探队. 1979. 晋中断陷石油普查评价报告[R](内部出版).
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 315-340.
- 山西省地质矿产局. 1997. 山西省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 275-318.
- 山西省文物局. 2006. 中国文物地图集山西分册[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 孙继源, 邢集善, 叶志光, 陈昌武. 1992. 华北地区板内构造及深部过程初探[J]. 地质科技情报, 11(1): 4-19.
- 田明中, 程捷. 2009. 第四纪地质学与地貌学[M]. 北京: 地质出版社, 221-222.
- 汪品先, 赵泉鸿, 翦知潜, 成鑫荣, 黄维, 田军, 王吉良, 李前裕, 李保华, 苏新. 2003. 南海三千万年的深海记录[J]. 科学通报, 48(21): 2206-2215.
- 王红强. 2007. 泥河湾盆地东谷坨剖面磁性特征及环境意义[J]. 第四纪研究, 27(6): 1081-1091.
- 王乃樑, 莫多闻, 杨景春, 莫多闻, 李有利, 潘懋. 1996. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京: 科学出版社, 120-156.
- 王尚义. 1997. 太原盆地昭余古湖的变迁及湮塞[J]. 地理学报, 52(3): 262-267.
- 魏荣珠, 李好斌, 徐朝雷, 张兆琪, 刘成如. 2017. 对山西隆起区中生代构造演化的认识[J]. 中国地质调查, 4(1): 24-34.
- 武烈, 巩玉琪, 苏宗正, 张幸远, 赵新平. 1981. 山西地震带地壳结构变化与地震活动特征[J]. 山西地震, (2): 1-4.
- 肖国桥, 詹涛, 葛俊逸. 2010. 地磁极性年表的发展回顾[J]. 地球科学进展, 25(4): 365-373.
- 邢作云, 赵斌, 涂美义, 邢集善. 2005. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. 地学前缘, 12(2): 247-262.
- 徐永, 李建星, 潘峰, 岳乐平. 2016. 吕梁山西麓红黏土的起始堆积时间及沉积过程[J]. 第四纪研究, 36(5): 1114-1124.
- 徐永, 唐亚明, 潘峰, 李建星, 张睿, 岳乐平. 2019. 吕梁山西麓吴家崓剖面红黏土的古地磁年代及构造意义[J]. 第四纪研究, 39(2): 328-338.
- 徐永, 岳乐平, 李建星, 王建其, 孙勃, 孙璐, 张佳音, 马冀. 2013. 吕梁山西麓复兴剖面红黏土的磁性地层学研究[J]. 地层学杂志, 37(1): 33-40.
- 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 肖国桥, 邵永新, 王旭龙, 郝青振, 卢演俦. 2006. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(1): 9-15.
- 岳乐平, 邓涛, 张云翔, 王建其, 张睿, 杨利荣, Heller F. 2004. 保德阶层型剖面磁性地层学研究[J]. 地层学杂志, 28(1): 48-51.
- 张崇立. 1993. 山西断陷带垂直形变特征及其成因初探[J]. 中国地震, 9(4): 327-333.
- 张世民. 2006. 汾渭地堑系盆地发育进程的差异及其控震作用[J]. 地质力学学报, (2): 30-37.
- 张锡麒. 1983. 山西晋中断陷晚新生代抱粉组合及其地层时代意义[C]//石油地质文集(5). 北京: 地质出版社.
- 张之恒. 2009. 中国考古通论[M]. 南京: 南京大学出版社: 4-7.
- 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 2007. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化[J]. 第四纪研究, 27(6): 922-944.
- 竺可桢. 1972. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 考古学报, 1: 15-38.