

山西榆社盆地新近系高庄组沉积环境演化

钱 程 韩建恩 余 佳 贺承广 朱大岗 邵兆刚 孟宪刚 王 津

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

提要:通过山西榆社盆地新近系高庄组剖面的野外地质调查以及沉积物粒度、碳酸盐、磁化率等环境指标的分析, 结合前人的 ESR 测年资料, 分析了上新世早期高庄组的沉积环境演化特征。认为榆社盆地上新世早期(5.25~3.16 Ma)以温暖湿润条件下的湖泊环境为主, 存在多次强弱不等的干旱气候波动, 且榆社古湖水体经历了 3 次稳定增加—波动性增加的周期性变化。5.25~4.50 Ma 盆地演化进入初次裂陷活动期, 水体经历稳定加深阶段—波动加深阶段, 形成桃阳段地层; 4.44~3.89 Ma 盆地演化进入裂陷稳定期, 对应南庄沟段的沉积, 水体经历稳定阶段—波动加深阶段; 3.81~3.16 Ma 盆地演化进入二次裂陷活动期, 对应醋柳沟段的沉积, 水体经历稳定加深阶段—波动平衡阶段, 其中 3.50~3.33 Ma 出现极端干旱的气候事件, 而后向温暖湿润环境转化。

关 键 词:高庄组; 榆社盆地; 沉积环境; 新近纪; 榆社古湖

中图分类号: P534.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)06-1607-11

山西省中东部地区发育一系列新生代的中小型山间盆地和中小型断陷盆地^[1]。其中, 榆社盆地发育在该区的晋中市范围内(北纬 36°47'~37°42'、东经 112°41'~113°19', 面积近 5000 km²), 属于太行山中段西麓中晚新生代断陷盆地的西缘山地^[1]。盆地呈 NNE-SSW 方向伸展, 其发育受控于其东侧的晋-获大断裂和西侧的汾渭地堑系东部的张性边界断裂, 为一个树枝状的碟形向斜盆地^[2]。盆地基底为三叠纪砂岩, 其上不整合堆积了厚约数百米的新近纪河湖相沉积, 产丰富的古脊椎动物化石和古植物化石^[3]。历来是学者研究新近纪古地理环境和沉积演化的理想地区。

自 20 世纪以来, 国内外诸多学者已对榆社盆地的河湖相地层进行了大量研究, 在本区发现了大量的古生物化石, 实测了地层剖面并测试了地层年代, 初步确定了该套河湖相沉积地层形成的大体时限, 并利用孢粉、古生物化石等信息, 初步探讨了榆社古

湖的古环境变迁^[1-15]。有关该套地层时代的归属和命名是由邱占祥等^[7] 20 世纪 80 年代通过对本地层的哺乳动物化石的分区分期研究中确定的, 并将该套地层划分为: 新近系上新统上部麻则沟组(N₂³m)、新近系上新统下部高庄组(N₂¹g)和中新统马会组(N₁m)。其后一些学者在本地区的研究中认可这一命名及其形成时代, 并被《中国地层典》应用^[1, 14, 15]。

新近系高庄组是榆社盆地新生代河湖相地层中的重要组成部分, 相当于以往认为的“榆社 II 带”和张村组的沉积^[9-11]。21 世纪以来有学者对本区的高庄组进行了野外调查和剖面实测^[1]。笔者对这条剖面进行野外系统调查, 发现其沉积记录可以代表榆社盆地上新世早期的沉积环境演化。由此, 笔者根据高庄组地层沉积物特征, 利用粒度、磁化率、碳酸盐等多种环境代用指标, 结合前人的年代数据^[1], 分析高庄组地层的沉积环境和榆社古湖的演化, 进而探讨华北地区上新世早期的古环境变化。

收稿日期: 2010-03-11; **改回日期:** 2010-09-30

基金项目: 中国地质调查局项目“华北地区古近系和新近系地层格架厘定”(1212010611704)和“活动构造与区域地质环境调查成果集成与综合研究”(国土资规函[2008]45 号)共同资助。

作者简介: 钱程, 男, 1985 年生, 硕士生, 从事构造地质、沉积相与古环境研究; E-mail: qch1985123@163.com。

1 地层剖面特征及其形成时代

1.1 地层剖面分段

根据野外地质调查,发现榆社盆地新近系高庄组剖片露头完好、沉积连续、厚度大。由野外的地层接触关系,可将高庄组剖面划分为3段,由下至上为桃阳段(N_2^1g)、南庄沟段(N_2^2g)和醋柳沟段(N_2^3g),分别位于山西省榆社县桃阳东、南庄沟西和羊圈埝(图1),与上覆海眼组(Qp^1h)呈角度不整合接触,与下伏地层三叠纪砂岩呈角度不整合接触,总厚度近300 m。

1.2 地层时代和岩性特征

邱占祥等^[16]根据榆社盆地新近系高庄组古生物资料和古地磁研究初步确定其形成于上新世早期

(5.2~3.4 Ma)。近年来,又有学者对这套地层提供了新的ESR测年数据,并结合古地磁年龄和生物地层序列确定其形成时间为5.25~3.16 Ma,属新近纪上新世早期^[1]。并确定其三段的形成时间分别为:桃阳段(N_2^1g)为5.25~4.50 Ma,南庄沟段(N_2^2g)为4.44~3.89 Ma,醋柳沟段(N_2^3g)为3.81~3.16 Ma^[1]。笔者对这条剖面的三段进行了详细的地质调查,发现地层总体倾向北西、倾角较小(小于 20°),沉积粒度较细,以砂和粘土为主,层理发育。结合剖面的岩性特征、颜色及粒级变化等特征可将这三段地层进一步划分6个岩性段(表1)。

2 粒度、磁化率、碳酸盐含量分析

榆社盆地新近系高庄组河湖相地层剖面中,由

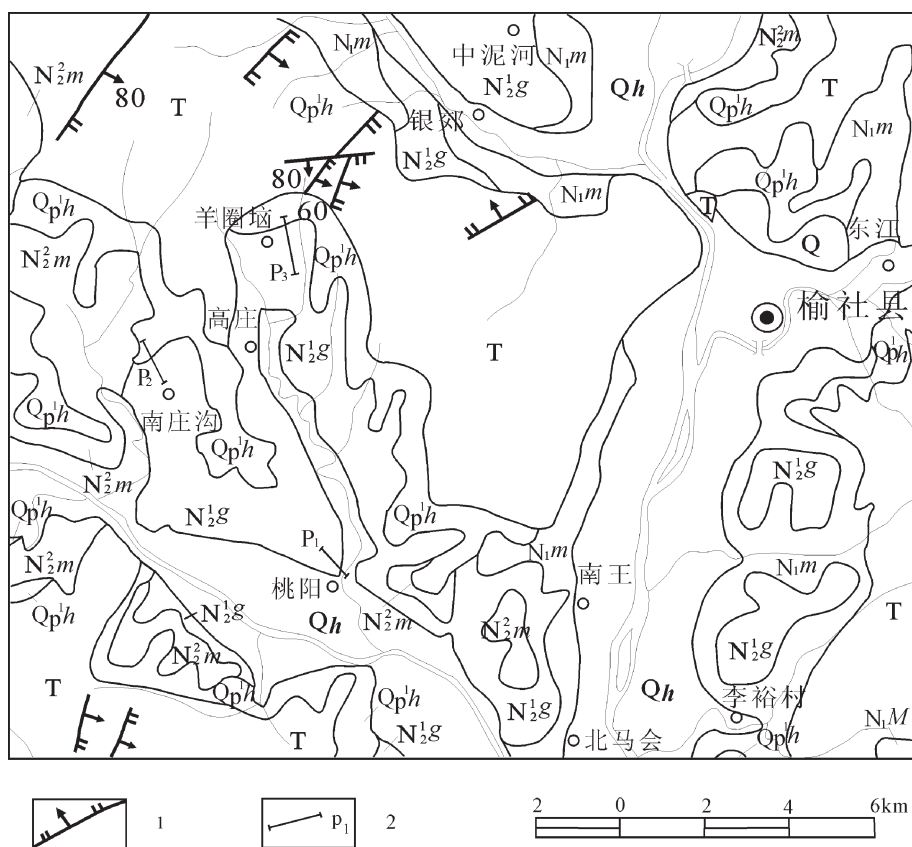


图1 山西榆社地区地质简图

Qh—全新统; Qp^1h —上新统海眼组; N_2^3m —上新统麻则沟组; N_2^1g —上新统高庄组; N_1m —中新统马会组;
T—三叠系; P_1 —桃阳段剖面位置; P_2 —南庄沟段剖面位置; P_3 —醋柳沟段剖面位置;1—断层;2—剖面位置及编号

Fig.1 Geological sketch map of Yushe area, Shanxi Province

Qh—Holocene; Qp^1h —Uppre Pleistocene Haiuan Formation; N_2^3m —Pliocene Mazegou Formation; N_2^1g —Pliocene Gaozhuang Formation; N_1m —Miocene Mahui Formation; T—Triassic; P_1 —Section location of Taoyang Member; P_2 —Section location of Nanzhuanggou Member; P_3 —Section location of Culiugou Member; 1—Faults; 2—Location and serial number of the section

表 1 山西榆社盆地新近系高庄组剖面描述
Table 1 Description of Gaozhuang section in Yushe Basin, Shanxi Province

组名	段名		厚度	层厚	岩性描述	ESR 年龄 ^[1]
上新统高庄组 N ₃ ¹	醋柳沟段 N ₃ ^{1c}	F 岩段	62.6m	15.5m	猪肝色粘土层夹泥质粗砂层，层理发育	3.16 Ma
				13.2m	灰紫色粗砂层，半固结或成岩	
				4.1m	灰紫色砂质粘土层，顶部为黄绿色泥岩	
				7.7m	灰紫色粗砂层，底部含砾	3.50 Ma
				6.7m	灰紫色泥质粗砂层，顶部为泥灰岩	
				15.4m	灰紫色含砾粗砂层	
	E 岩段	54.2m		11.6m	猪肝色砂质粘土层，顶部为细砂层	3.50 Ma
				12.3m	褐黄色含砾粗砂层	3.81 Ma
				30.3m	猪肝色粘土层，下部含角砾	
	南庄沟段 N ₃ ^{1b}	D 岩段	56.7m	17.8m	紫色砂质粘土层夹黄色泥质细砂层和砂层	3.89 Ma
				6.1m	灰黄色、紫色含砾粗砂层	
				7.3m	锈黄色粗砂层和猪肝色粘土层互层	
				6.8m	土黄色细砂层，层理发育	4.28 Ma
				8.5m	褐色粘土层，局部夹砂质粘土	
				2.3m	浅灰色薄层状泥灰岩	
	C 岩段	23.1m		7.9m	灰黄色粘土岩夹薄层状粗砂岩，顶底见薄砂层。层理发育	4.28 Ma
				5.7m	锈黄色粗砂层，由深、浅锈黄色粗砂组成。层理发育	4.28 Ma
				8.5m	灰紫色砂质粘土层，底部夹薄层半固结黄色细砂岩	4.44 Ma
	桃阳段 N ₃ ^{1a}	B 岩段	47.4m	8.9m	锈黄色粗砂层，底为砾岩	
				3.2m	土黄色粗砂层夹细砾岩，砂层常见炭质细线，具斜层理	4.50 Ma
				4.5m	紫色粘土层夹薄层土黄色细砂层	
				33.0m	土黄色细—粉砂层夹猪肝色粘土层，半固结。含不规则细砂岩结核，其扁平面与层理平行。层理发育	
				6.7m	猪肝色粘土层	4.98 Ma
	A 岩段	31.8m		2.3m	金黄色泥质细砂层，层理发育	4.98 Ma
				29.5m	金黄色厚层—巨厚层粗砂层，夹薄层猪肝色粘土层、砂质粘土层，局部含细砾，底为砾岩，斜层理发育	5.25 Ma

于剖面局部地势较陡，因此在三段剖面的采样中按 1.5~2 m 间距进行了连续采样，根据岩性和层间的变化情况,桃阳段取样 67 个,南庄沟段取样 45 个，醋柳沟段取样 58 个，共选取 170 个样品进行粒度、磁化率、碳酸盐含量分析测定。

粒度、磁化率、碳酸盐含量在中国地质科学院地质力学研究所第四纪实验室进行测试。粒度测试使用中国科学院南京地理与湖泊研究所研制的 CG-1 离心沉降式粒度分布测定仪进行测试，磁化率测定使用南京师范大学与江苏海洋大地科技公司研制的 SUS-

942 磁化率仪测试，碳酸盐含量使用中国科学院南京地理与湖泊研究所研制的碳酸盐含量分析仪完成。

由高庄组地层的粒度、磁化率、碳酸盐含量分析表明,三项环境代用指标存在明显的变化,可以反映榆社盆地当时的沉积环境变化过程,其中桃阳段、南庄沟段和醋柳沟段三段的磁化率变化范围分别为 5×10⁻⁶~44×10⁻⁶SI、9×10⁻⁶~109×10⁻⁶SI 和 6×10⁻⁶~98×10⁻⁶SI，粒度中值粒径变化范围分别为 4.32~154.26 μ m、5.52~184.64 μ m 和 5.46~159.09 μ m，碳酸盐含量变化范围分别为 0~52.67%、0.35%~20.54%和 0~

30.93%。

2.1 粒度、碳酸盐含量、磁化率所指示的环境意义

2.1.1 粒度

湖泊沉积物的粒度特征由沉积物物源的原始颗粒、流体搬运能力及沉积环境共同控制。一般来说由湖岸到湖心,沉积物颗粒逐渐变细且平行于湖岸线呈同心圆带状分布,随着湖面的扩张和收缩,沉积物分布带随之移动。因此某一点的沉积物粒度粗细变化可以反映湖泊水位高低变化。细粒和粗粒分别代表湖泊的高水位时期和低水位时期,分别对应气候的湿润期和干旱期^[17-19]。但湖泊沉积物的粒度分布主要是受湖水能量控制,粒度组成与沉积环境不是简单的线性关系。当气候湿润,降水量大,地表径流增加,湖水补给充分,湖面升高,湖岸线后退,同一沉积位置由于距湖岸变远,湖水能量降低使得物质较细。但是由于气候湿润条件下,降雨量大,地表径流增大,湖泊流体水动力增大,较粗颗粒也可以被带到离湖岸更远的地方,甚至湖心;反之,气候干旱时,可以是因湖面降低而沉积粗颗粒,而较弱的地表径流也会造成粗颗粒物质的搬运能力下降^[20-22]。因此,利用粒度特征判识气候环境的变化,在考虑湖泊自身环境因素的同时,还需结合其他环境指标综合分析。

2.1.2 碳酸盐含量

碳酸盐类矿物是湖泊沉积物的重要组成部分,其来源于湖泊周围地区岩石风化剥蚀,因此其含量的变化受制于湖区的气候特征和湖水量变化。当蒸发量远远大于降水量,湖水中的 Ca^{2+} 出现过饱和状态,湖泊沉积物中碳酸盐含量增加;而入湖水量增大时,湖水淡化,湖泊沉积物碳酸盐含量降低,所以湖泊沉积物碳酸盐含量的高低分别指示了湖水的咸化和淡化,间接反映了气候的干湿变化^[23,24]。另外,碳酸盐沉积含量的变化还与源区内溶蚀的碳酸盐总量有关,即在前期强烈湿润,降雨充足的环境周期后的干旱,才产生强烈的碳酸盐高值显示。

2.1.3 磁化率

湖泊沉积物磁化率是表征沉积物磁学特征的物理量,近年来研究认为,样品的磁化率相对较高,相应的沉积物粒度则较细,表明样品是在相对暖湿的环境下形成的;反之,样品的磁化率相对较低^[25-28]。因此湖泊沉积物磁化率变化记载的环境变化信息可用其分析古气候变化规律及其细节、推断样品形成过程的环境条件,为古环境研究提供可靠的磁学证据。

2.2 粒度、碳酸盐含量、磁化率变化特征分析

根据榆社盆地高庄组河湖相沉积物的粒度、碳酸盐含量、磁化率曲线的总体特征,结合岩性变化特征(图 2),发现高庄组的三段沉积地层对应了榆社古湖上新世早期湖泊水体 3 次周期性变化。这 3 段可划分为 6 个湖泊演化期,大致与 6 个岩性段相对应。各期沉积环境变化特征如下。

2.2.1 桃阳段期(5.25~4.50 Ma)

该段地层的沉积物主要为金黄色厚层粗砂层、土黄色中-细砂层和猪肝色薄层粘土层,发育平行层理、斜层理。该期为湖泊形成后,水体增加的时期。由这期沉积物的粒度、碳酸盐含量、磁化率曲线变化特征,可分为两期,大致对应 A 和 B 两段的沉积。

A 段(5.25~4.98 Ma):该段地层中采集了 22 个样品,其中值粒径在 $7.76\sim 154.26\mu\text{m}$,除第一个样品的碳酸盐含量为 4.5%,其他均为 0,磁化率为 $10\times 10^{-6}\sim 44\times 10^{-6}\text{SI}$ 。由这段的粒度、碳酸盐含量、磁化率曲线变化分析,初始粒度、磁化率均存在一个迅速增大的高值显示,为桃阳段剖面的最高值,其中磁化率存在两次明显高值波动,而粒度反应为一个高极值显示,并与第二个磁化率高极值对应,反应湖泊水量波动性快速增加的过程;而后粒度和碳酸盐含量的波动幅度明显减弱,且二者呈正相关变化,反应湖水已有一定的规模,气候继续向湿润方向发展;而整段碳酸盐含量由最初的 4.5%,迅速降为 0 值显示,反应湖水当时可能具有外流特征。

B 段(4.98~4.50Ma):该段地层中采集了 45 个样品,其中值粒径在 $4.32\sim 53.34\mu\text{m}$,碳酸盐含量为 2.75%~52.67%,磁化率为 $5\times 10^{-6}\sim 38\times 10^{-6}\text{SI}$ 。本段初始的中值粒径在高背景基础上整体略具升高,磁化率总体特征与粒度特征一致,碳酸盐含量逐渐增大,出现该剖面的最值,说明此时湖泊水体逐渐收缩,反映环境略显干旱趋势;而后磁化率、粒度和碳酸盐含量曲线波动特征明显,其中磁化率变化幅度增大,但总体磁化率和粒度呈正相关关系,而与碳酸盐含量呈反相关,反映环境整体湿润背景下存在明显的干旱气候波动,而干旱阶段则对应有较高的碳酸盐含量和较低的粒度值及磁化率。

2.2.2 南庄沟段期(4.44~3.89 Ma)

该段地层的沉积物主要为锈黄色粗砂层,猪肝色、褐色粘土层和土黄色中粒-细粒砂层,发育斜层理、平行层理。该期为湖泊稳定期,水体变化不大。由

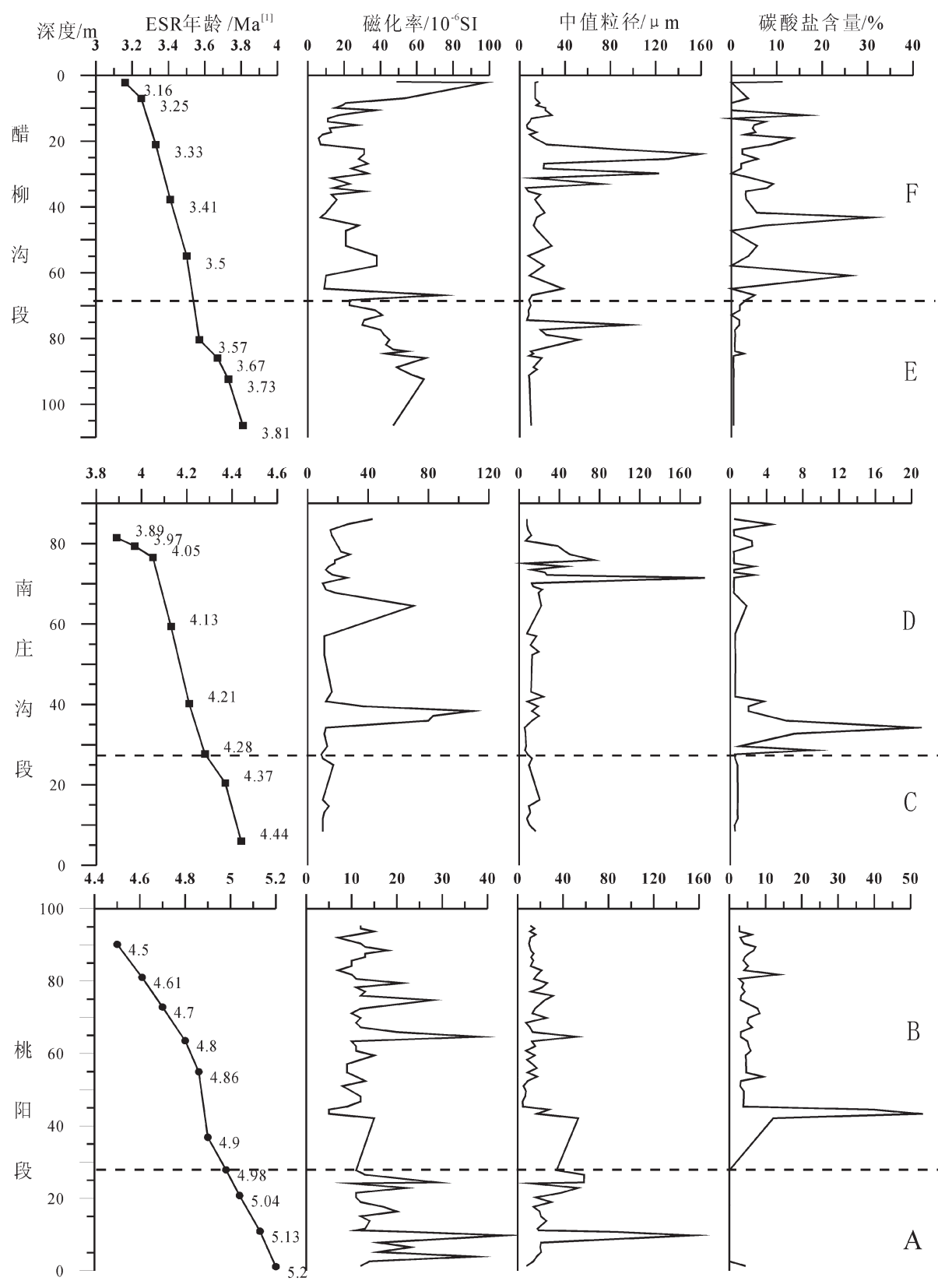


图 2 榆社盆地高庄组湖相沉积物粒度、碳酸盐含量和磁化率分析结果
Fig.2 Particle sizes, carbonate content and susceptibility of lacustrine sediments in Yushe Basin

这期沉积物的粒度、碳酸盐含量、磁化率曲线变化特征,可将其分两期,大致对应 C 和 D 两段的沉积。

C 段 (4.44~4.28Ma): 在该段中采集了 9 个样品,样品的中值粒径为 7.81~20.65 μm ,碳酸盐含量为 0.47%~0.82%,磁化率为 $9\times 10^{-6}\sim 17\times 10^{-6}\text{SI}$ 。此环境带,粒度、磁化率、碳酸盐含量均变化不大,曲线比较平坦,磁化率、碳酸盐含量均出现整个剖面的最小值,中值粒径含量也很小,明显地表现为湖泊水体比较大,变化幅度较小;沉积物粒度较小,说明环境较稳定,但中值粒径曲线有一个较小的峰值,反映水体有较小的下降,之后又恢复。

D 段 (4.28~3.89 Ma): 在该段中采集了 36 个样品,样品的中值粒径为 5.52~184.64 μm ,碳酸盐含量为 0.35%~20.54%,磁化率为 $11\times 10^{-6}\sim 109\times 10^{-6}\text{SI}$ 。初期可见,碳酸盐、磁化率曲线波动幅度明显增强,是整个剖面变化最剧烈的时期,其中磁化率有一次明显的高极值波动,碳酸盐有 3 次明显的波动过程且中间一次是整个剖面的极高值,反映气候干湿变化剧烈,有 3 次大的干旱—湿润变化过程,湖泊水体动荡剧烈;其后中值粒径、磁化率和粒度曲线波动特征明显,中值粒径整体略有升高,磁化率总体特征与碳酸盐曲线变化基本一致,环境总体具有向湿润方向发展,但碳酸盐含量曲线出现 5 次明显的波峰,说明了湖泊存在动荡的萎缩现象,存在数次干旱期。

2.2.3 醋柳沟段期 (3.81~3.16 Ma)

该段地层的沉积物主要为褐黄色、土黄色、猪肝色、灰绿色砂质粘土层—粘土层,局部含砾,发育斜层理、平行层理,属于深湖期的沉积,水体略有增加。由这期沉积物的粒度、碳酸盐含量、磁化率曲线变化特征,可将其分为两期,大致对应 E 和 F 两段的沉积。

E 段 (3.81~3.50 Ma): 在该段中采集了 22 个样品,样品的中值粒径为 6.47~38.10 μm ,碳酸盐含量为 0~5.14%,磁化率为 $9\times 10^{-6}\sim 73\times 10^{-6}\text{SI}$ 。碳酸盐含量较小,出现剖面的最低值,趋于 0,平均粒径也出现了剖面的最小值,有两次波动,磁化率与中值粒径呈明显的负相关,出现最大值,表明这一时期气候比较温暖湿润,湖泊水体较大,水动力较强,纵观整个剖面,此阶段可能为湖泊水体的最高峰。

F 段 (3.50~3.16 Ma): 在该段中采集了 36 个样品,样品的中值粒径为 5.46~159.09 μm ,碳酸盐含量为 0~230.93%,磁化率为 $6\times 10^{-6}\sim 98\times 10^{-6}\text{SI}$ 。磁化率、粒度和碳酸盐含量曲线波动特征十分明显,峰值起

伏较大,且这阶段都出现剖面的最大值,前半段中可见碳酸盐含量峰值较高,波动强烈,而磁化率和中值粒径较低,具波动性,说明湖泊水体存在几次强烈的萎缩,动力条件较弱,其中高的碳酸盐含量很可能表明了极端干旱的气候事件,大体对应的时间段为 3.50~3.33 Ma,但波动性的强烈诠释了干旱环境的背景下数次湿润事件;后半段中磁化率和中值粒径波峰较高,均出现整个剖面的最高值,而碳酸盐含量较低,且中值粒径与磁化率曲线显示了负相关的对应关系,反应湖泊水量总体较大,水动力较强,低碳酸盐含量表明湖泊水体的补给量大于蒸发量,气候向温暖湿润趋势变化明显。

综上所述,粒度、碳酸盐含量、磁化率分析结果记录了榆社盆地上新世早期古湖水体不断波动性增加的演化过程,气候逐步向温暖湿润环境转化的过程,其中波动性明显,且存在数次强弱不等的干旱化事件。

3 高庄组指示的榆社古湖的古沉积环境

由黄土—红粘土、孢粉及古脊椎动物化石分析,中国在上新世早期呈现的气候是以温暖湿润为主,夏季风强弱变化大且具波动性^[29-34]。而本区新近系高庄组孢粉组合分析中,木本植物花粉占优势为 73.7%,草本植物花粉次之占 23%,蕨类孢子最少占 1.7%^[9,12],反映温湿气候下的森林、灌丛、草原交混环境,体现由稀疏森林草原植被向针叶林为主的针阔叶混交林植被转化^[10,11,12,35,36]。本组地层中的大量脊椎化石^[37,38]和介形化石^[11]的发现,也证实了当时的温湿环境为主的湖泊环境^[39-41]。而本文根据新近系高庄组湖相地层沉积物特征及粒度、碳酸盐含量、磁化率分析结果,榆社盆地上新世早期湖泊环境演化明显呈现 3 次水体稳定增加—波动性增加的周期性变化,以温暖湿润为主的气候,反映了盆地的初次裂陷活动期、裂陷稳定期和二次裂陷活动期的 3 期演化(图 3)。

3.1 初次裂陷活动期

该时期 (5.25~4.50 Ma) 对应桃园段的沉积。此段中的 A 岩段 (5.25~4.98 Ma) 体现了湖泊水体稳定加深,入湖径流巨大,水动力很强,水体迅增,湖泊水位快速上升,反映气候温暖湿润,湖泊进入成湖后的湖水扩张期;B 岩段 (4.98~4.50 Ma) 体现了湖泊水体

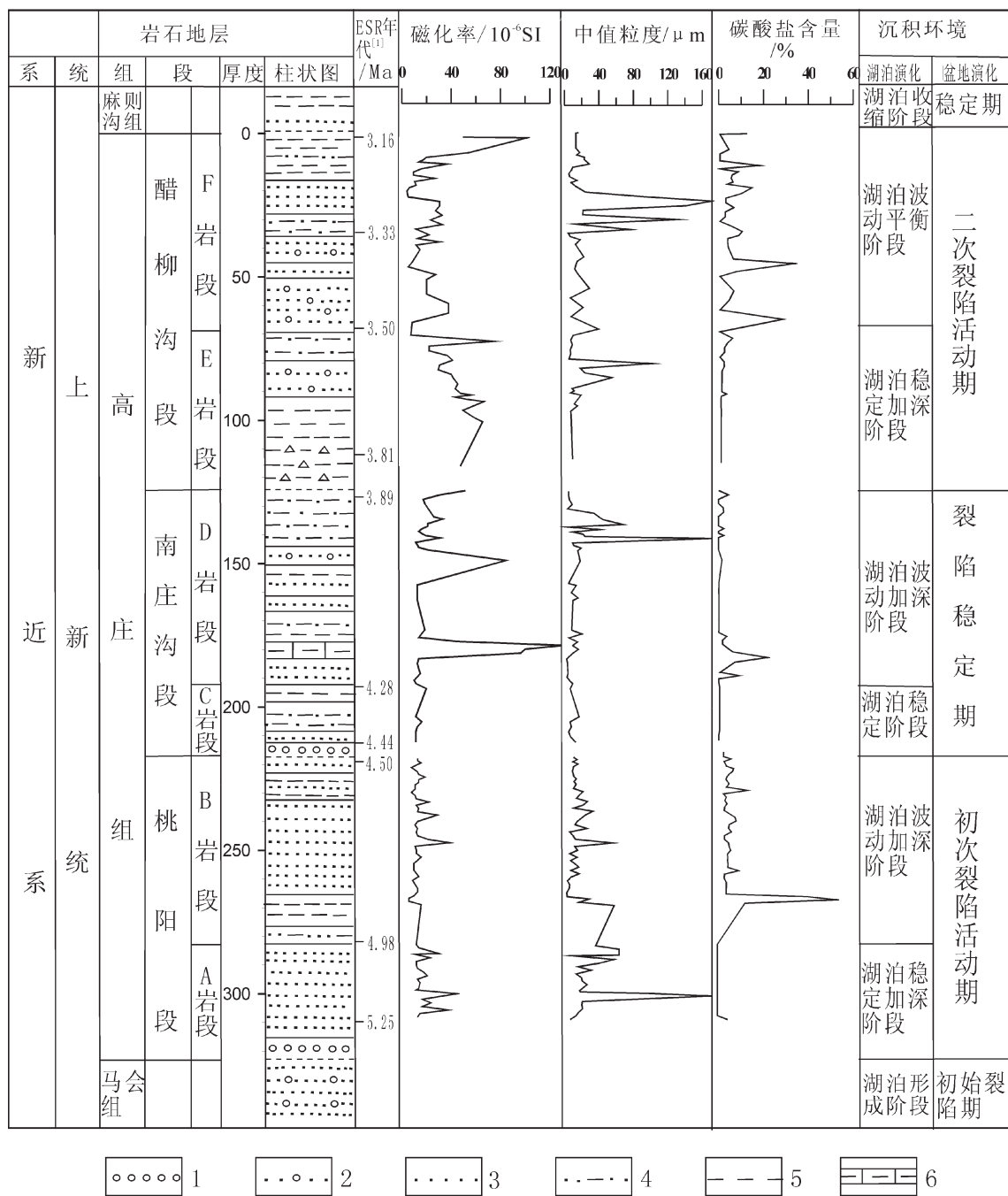


图 3 山西榆社盆地高庄组地层、粒度、碳酸盐含量和磁化率与沉积环境对比

1—砾石层；2—含砾砂层；3—砂层；4—砂质粘土层；5—粘土层；6—泥灰岩

Fig.3 A comparison between strata of Gaozhuang Formation, particle sizes, carbonate content and susceptibilities to sedimentary environments in Yushu Basin, Shanxi Province

1—Gravel layer; 2—Conglomeratic sand layer; 3—Sand layer; 4—Sandy clay layer; 5—Clay; 6—Muddy limestone

波动加深,最初水动力减弱,湖泊水体收缩,存在短期的干旱气候,而后湖泊水位波动增加,反映环境具有湿润气候趋势但存在干旱气候的波动。榆社古湖的水体在这一时期呈现了由稳定增加—波动性增加

的第一次周期性变化。

3.2 裂陷稳定期

该时期(4.44~3.89 Ma)对应南庄沟段的沉积。此段中的 C 岩段(4.44~4.28 Ma)体现了稳定的湖泊

水体,湖泊水体较大,变化幅度较小,环境湿润且稳定,其中存在一个很短的干早期;D 岩段(4.28~3.89 Ma)体现了湖泊水体波动加深,环境波动性强,存在至少 3 次明显的干湿变化,水动力条件变化也较为明显,但环境整体以湿润为主,存在几次干早期,且干旱程度变化不一。榆社古湖的水体在这一时期呈现了由稳定—波动性增加的第二次周期性变化。

3.3 二次裂陷活动期

该时期(3.81~3.16 Ma)对应醋柳沟段的沉积。此段中的 E 岩段(3.81~3.50 Ma)体现了湖泊水体的稳定加深,气候比较温暖湿润,湖泊水体可能出现最大状态;F 岩段(3.50~3.16 Ma)体现了波动平衡的湖泊水体,环境波动性强,且变化复杂,湖泊水体由萎缩到增加过程,水动力条件由弱到强,气候由前期的干旱事件(3.50~3.33 Ma)向温暖湿润环境转化。榆社古湖的水体在这一时期呈现了由稳定加深—波动性平衡的第三次周期性变化。

4 结 论

(1)上新世早期,榆社古湖发育,水体扩大。榆社盆地在中新世末初始裂陷期的基础上,经历了初次裂陷活动期、裂陷稳定期和二次裂陷活动期 3 个阶段。湖泊水体演化反映了 3 次稳定增加—波动性增加的周期性变化,具体为水体稳定加深阶段—波动加深阶段—稳定阶段—波动加深阶段—稳定加深阶段—波动平衡阶段。盆地的 3 期演化和湖泊水体的 3 次周期性变化都大致对应高庄组的桃阳段、南庄沟段和醋柳沟段的形成时段。高庄组的孢粉组合分析体现当时(5.25~3.16 Ma)的植被特征是由稀疏森林草原植被向针叶林为主的针阔叶混交林植被转化^[10,11,12,35,36],大量脊椎化石^[37,38]和介形化石^[11]的发现分析也证实了当时的温湿环境^[39-41],其沉积物的粒度、碳酸盐含量、磁化率分析结果很好地反映这一环境特征。

(2)5.25~4.50 Ma 呈现湖泊水体由稳定增加—波动性增加的第一次周期性变化,盆地演化进入初次裂陷活动期,对应桃园段的沉积。沉积物的粒度、碳酸盐含量、磁化率环境代用指标分析表明:5.25~4.98 Ma 湖泊水体稳定加深,入湖径流巨大,水动力很强,湖泊水位快速上升,气候温暖湿润;4.98~4.50 Ma 湖泊水体波动加深,最初水动力减弱,湖泊水体收缩,存在短期的干旱气候,而后湖泊水位波动增

加,环境具有湿润气候趋势但存在干旱气候的波动。
(3)4.44~3.89 Ma 呈现湖泊水体由稳定—波动性增加的第二次周期性变化,盆地演化进入裂陷稳定期,对应南庄沟段的沉积。4.44~4.28 Ma 湖泊水体稳定,水体较大,变化幅度较小,水动力条件较弱,环境湿润,其中存在一个很短的干早期;4.28~3.89 Ma 湖泊水体波动加深,水动力条件变化也较为明显,初期存在 3 次明显的干湿变化,而后又出现数次较小的变化,整体环境以湿润为主,存在数次干早期,且干旱强度不一。

(4)3.81~3.16 Ma 呈现湖泊水体由稳定加深—波动性平衡的第三次周期性变化,盆地演化进入二次裂陷活动期,对应醋柳沟段的沉积。3.81~3.50 Ma 湖泊水体的稳定加深,水体较大,湖泊水体可能出现最大状态,水动力较强,气候温暖湿润;3.50~3.16 Ma 湖泊水体由萎缩到增加过程,水动力条件由弱到强,环境波动性强,且变化复杂,3.50~3.33 Ma 为极端干旱的气候事件,而后向温暖湿润环境转化。

参考文献(References):

[1] 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 山西榆社地区新近纪地层时代讨论 [J]. 中国地质, 2009, 36(2):300-313.
Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zaogang, et al. A discussion on the age of the Neogene strata in Yushe area, Shanxi Province [J]. Geology in China, 2009, 36(2): 300-313(in Chinese with English abstract).

[2] 黄宝玉, 郭书元. 山西中南部晚新生代地层和古生物群 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
Huang Baoyu, Gou Shuyuan. Late Cenozoic Stratigraphy and Palaeontology Form Central -Southeastern Region of Shanxi [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991 (in Chinese with English abstract).

[3] 山西省地质矿产局. 山西省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shanxi Province. Regional Geology of Shanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988 (in Chinese with English abstract).

[4] Teilhard de chardin P, Young C C. Preliminary observations on the Pre-loessic and Post-Pontain Formations in Western Shansi and Northern Shansi [J]. Geol. Men., Surv. China, Ser A. 1930, No.8:1-90.

[5] 杨钟健. 中国上新统与更新统之分界问题 [J]. 科学, 1940, 24(4): 261-280.
Yung Chungchien. The boundary between Pliocene and Pleistocene [J]. Science, 1940, 24 (4):261-280(in Chinese).

[6] 裴文忠, 周明镇, 郑家坚. 中国的新生界 [M]. 北京: 科学出版社, 1963.
Pei Wenzhong, Zhou Mingzhen, Zheng Jiajian. Cenozoic Group of

- China [M]. Beijing: Science Press, 1963(in Chinese).
- [7] 邱占祥, 阎德发. 山西榆社一有角大唇犀 [J]. 古脊椎动物与古人类, 1982, 20(2): 122–132.
- Qiu Zhanxiang, Yan Defa. A Horned Chiloitherium skull from Yushe, Shanxi [J]. Vertebrata Palasiatica, 1982, 20 (2): 122–132 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邱占祥, 理·戴福德. 山西榆社狐化石一新种[J]. 古脊椎动物学报, 1990, 28(4): 245–258.
- Qiu Zhanxiang, Tedford R. H. a Pliocene species of *I'ulpes* from Yushe, Shanxi [J]. Vertebrata Palasiatica, 1990, 28 (4): 245–258 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘兰锁. 山西榆社组地质时代的商榷[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 105–110.
- Liu Lansuo. Sporo–pollen analysis of the Yushe formation and its geological age [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3(4): 105–110(in Chinese with English abstract).
- [10] 何培元. 论“榆社组”地层的时代归属及其环境变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(2): 77–89.
- He Peiyuan. On the geological age of the “Yushe formation” and its environment variation [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1984, 4(2): 77–89(in Chinese with English abstract).
- [11] 曹照垣, 邢历生, 于清河. 榆社组磁性地层的年代与界线 [J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1985, (6): 143–154.
- Cao Zhaoyuan, Xing Lisheng, Yu Qinhe. The age and boundary of magnetic strata of the Yushe formation [J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS, 1985, 6: 143–154 (in Chinese with English abstract).
- [12] 曹家欣, 崔海亭. 山西榆社上新世植物群及环境 [J]. 地质科学, 1989(4): 369–375.
- Cao Jiaxin, Cui Haiting. Research of Pliocene flora and Paleoenvironment of Yushe basin on Shanxi Plateau, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1989, 4: 369–375 (in Chinese with English abstract).
- [13] 董为, 胡长康. 记山西榆社后恼的晚中新世鹿科化石[J]. 古脊椎动物学报, 1994, 32(3): 209–227.
- Dong Wei, Hu Changkang. The late Miocene Cervidae from Hounao, Yushe basin, Shanxi [J]. Vertebrata Palasiatica, 1994, 32 (3): 209–227 (in Chinese with English abstract).
- [14] 《中国地层典》编委会. 第三系(郑家坚、何希贤、邱铸鼎等编著) [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- The Editor Committee of the China's Strata. The Tertiary System [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999(in Chinese).
- [15] 王乃文, 何希贤. 新近系 [C]//汪啸风, 陈孝红, 等编著. 中国各地质时代地层划分与对比. 北京: 地质出版社, 2005: 523–558.
- Wang Naiwen, He Xixian. The Palaeogene [C]//Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong (eds.). Stratigraphic Division and Correlation of Each Geologic Period in China. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 523–558 (in Chinese).
- [16] 邱占祥, 丘铸鼎. 中国晚第三纪地方哺乳动物化石的排序及其分期[J]. 地层学杂志, 1990, 14(4): 241–260.
- Qiu Zhanxiang, Qiu Zhuding. Neogene local mammalian faunas: Succession and ages [J]. Journal of Stratigraphy, 1990, 14 (4): 241–260 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈敬安, 万国江. 云南洱海沉积物粒度组成及其环境意义辨识 [J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 175–182.
- Chen Jing'an, Wan Guojiang. Sediment particle size distribution and its environmental significance in lake Erhai, Yunnan Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999, 19 (2): 175–182 (in Chinese with English abstract).
- [18] 杨晓强, 李华梅. 泥河湾盆地沉积物磁化率及粒度参数对沉积环境的响应[J]. 沉积学报, 1999, 17: 763–768.
- Yang Xiaoqiang, Li Huamei. The sediment susceptibility and grain–size profile response to change of depositional environment in Nihewan basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17: 763–768(in Chinese with English abstract).
- [19] 战庆, 王张华, 王昕, 等. 长江口区晚新生代沉积物粒度特征和沉积地貌环境演变[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 674–683.
- Zhang Qing, Wang Zhanghua, Wang Xin, et al. Grain–size characteristics and geomorphology evolution in Late Cenozoic Era sediments, Changjiang Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 674–683(in Chinese with English abstract).
- [20] 王津, 朱大岗, 孟宪刚, 等. 西藏札达盆地古格组剖面沉积环境演化特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1005–1012.
- Wang Jin, Zhu Dagang, Meng Xiangang, et al. Features of the change in Pliocene depositional environment at the Guge formation section in the Zanda basin, Tibet [J]. Geology in China, 2006, 33 (5): 1005–1012(in Chinese with English abstract).
- [21] 刘艳霖, 乐平, 帕拉提. 西老高川红粘土剖面粒度磁化率特征及古环境意义[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 496–501.
- Liu Yanlin, Yue Leping, Parati. Haracters of grain–size susceptibility of the Neogene Laogaochuan red clay section, Shaanxi, and its paleoenvironment significance [J]. Geology in China, 2005, 32(3): 496–501(in Chinese with English abstract).
- [22] 王秋良, 李长安, 谢远云, 等. 江陵剖面沉积物的粒度特征及其古气候意义[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1406–1410.
- Wang Qiuliang, Li Changan, Xie Yuanyun, et al. Grain–size characteristics of sediments in the Jiangling section and their paleoclimatic significance [J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1406–1410(in Chinese with English abstract).
- [23] 谭红兵, 马海州, 张西营. 碳酸盐含量研究与其记录的环境变化 [J]. 盐湖研究, 2003, 11(4): 20–27.
- Tan Hongbing, Ma Haizhou, Zhang Xiyong. Study on carbonates and its record for environmental changes [J]. Journal of Salt Lake Research, 2003, 11(4): 20–27(in Chinese with English abstract).
- [24] 王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐含量化学沉积与气候环境变化[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(1): 31–36.
- Wang Yunfei. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic–environmental evolution—a case study of Qinghai lake and Daihai Lake [J]. Oceanologia & Limnologia Sinica, 1993, 24 (1): 31–36(in Chinese with English abstract).

1616	中 国 地 质	2010 年
[25]	李福春, 谢昌仁, 金章东, 等. 南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学和磁化率与古气候变化的关系 [J]. 中国地质, 2003, 30(1): 93–98. Li Fuchun, Xie Changren, Jin Zhangdong, et al. Rubidium and strontium geochemistry in the Laohushan loess section, Nanjing, and relation between magnetic susceptibility and paleoclimatic change [J]. Geology in China, 2003, 30(1):93–98(in Chinese with English abstract).	Yu Jia, Luo Peng, Han Jianen, et al. Records of Environmental Change in Pliocene a long Tuolin Formation in Zanda Basin, Tibet [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28 (4):341–348 (in Chinese with English abstract).
[26]	Hirons K R, Thompson R. Palaeoenvironmental application of magnetic measurements from Inter –Drumlin Hollow Lake sediments near Dungannon Co. Tyrone, Northern Ireland [J]. Boreas, 1986, 1: 117–135.	[34] 余佳, 罗鹏, 韩建恩, 等. 西藏札达盆地古格剖面孢粉记录及其反映的古环境信息[J]. 中国地质, 2007, 34(1):55–60. Yu Jia, Luo Peng, Han Jianen, et al. Sporopollen records in the Guge section of the Zanda basin, Tibet, and paleoenvironmental information reflected by it [J]. Geology in China, 2007, 34 (1):55–60 (in Chinese with English abstract).
[27]	Hu Shouyun, Wang Sumin, Erwin Appel. Environmental mechanism of magnetic susceptibility changes of lacustrine sediments from Lake Hulun, China [J]. Science in China (Series D), 2000, 43 (5): 534–540.	[35] 王惠基. 山西榆社楼则峪组和张村组的地质时代 [J]. 地层学杂志, 1992, 16(4):290–291. Wang Huiji. Ages of the Louzeyou and Changtsun Formations in Yushe, Shanxi [J]. Journal of Stratigraphy, 1992, 16 (4):290–291 (inChinese with English abstract).
[28]	张普纲, 樊行昭, 霍俊杰. 磁性参数的环境指示意义 [J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(3):301–308. Zhang Pugang, Fan Xingzhao, Huo Junjie. Environment designating singification of magnetic parameters [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34 (3):301–308 (in Chinese with English abstract).	[36] 李小强, 李承森, 鹿化煜, 等. 山西榆社—太谷盆地上新世中晚期的植被与环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 22(1):103–108. Li Xiaoqiang, Li Chengsen, Lu Huayu, et al. Paleovegetation and paleoenvironment in middle–late Pliocene Yushe and Taigu basins, eastern Shanxi, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 22 (1):103–108(in Chinese with English abstract).
[29]	丁仲礼, 孙继敏, 朱日祥, 等. 黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题[J]. 第四纪研究, 1997(2):147–157. Ding Zhongli, Sun Jiming, Zhu Rixiang, et al. Eolian origin of the red clay deposition in the loess plateau and implications for Pliocene climatic changes [J]. Quaternary Sciences, 1997(2):147–157 (in Chinese with English abstract).	[37] 陈冠芳. 山西榆社上新世山羊类一新属 [J]. 古脊椎动物学报, 1991, 29(3):230–236. Chen Guanfang. A new genus of caprini (Bovidae, Ariodactyla) from upper Pliocene of Yushe, Shanxi [J]. Vertebrata Palasiatica, 1991, 29(3): 230–236(in Chinese with English abstract).
[30]	薛祥煦, 鹿化煜, 周杰. 陕西旬邑新近系红土剖面粒度组成的古气候意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(1):118–123. Xue Xiangxu, Lu Huayu, Zhou Jie. Paleoclimatic significance of grain–size composition of Neogene Red Earth at Xunyi, Shaanxi Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1):118–123(in Chinese with English abstract).	[38] 理·戴福德, 邱占祥. 山西榆社上新世的貉(食肉目,犬科)化石兼论中国的貉化石[J]. 古脊椎动物学报, 1991, 29(3):176–189. Richard H, Tedford, Qiu Zhanxiang. Pliocene Nyctereutes (Carnivora:Canidae) from Yushe, Shanxi, with comments on Chinese fossil raccoon–dogs [J]. Vertebrata Palasiatica, 1991, 29 (3):176–189 (in Chinese with English abstract).
[31]	吴珍汉, 吴中海, 叶培盛, 等. 青藏高原晚新生代孢粉组合与古环境演化[J]. 中国地质, 2006, 33(5):966–979. Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Ye Peisheng, et al. Late Cenozoic environmental evolution of the Qinghai–Tibet Plateau as indicated by the evolution of sporopollen assemblages [J]. Geology in China, 2006, 33 (5):966–979(in Chinese with English abstract).	[39] 李传夔, 吴文裕, 邱铸鼎. 中国陆相新第三系的初步划分与对比 [J]. 古脊椎动物学报, 1984, 22(3):163–178. Li Chuankuei, Wu Wenyu, Qiu Zhuding. Chinese Neogene: Subdivision and correlation [J]. Vertebrata Palasiatica, 1984, 22 (3): 163–178(in Chinese with English abstract).
[32]	朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 西藏阿里札达盆地上新世–早更新世河湖相地层年代学研究[J]. 中国地质, 2007, 34(6):983–992. Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang, et al. Chronology of Pliocene –early Pleistocene lacustrine strine strata in the Zanda basin Ngari area, Tibet [J]. Geology in China, 2007, 34 (6):983–992 (in Chinese with English abstract).	[40] 邱占祥, 邱铸鼎. 中国晚第三纪地方哺乳动物化石的排序及其分期[J]. 地层学杂志, 1990, 14(4):241–260. Qiu Zhanxiang, Qiu Zhuding. Neogene local mammalian faunas: Succession and ages [J]. Journal of Stratigraphy, 1990, 14 (4):241–260 (in Chinese with English abstract).
[33]	余佳, 罗鹏, 韩建恩, 等. 西藏札达盆地上新世托林组剖面环境变化记录[J]. 地球学报, 2007, 28(4):341–348.	[41] 董永生, 郑少华, 邱铸鼎. 中国新生代哺乳动物分期 [J]. 古脊椎动物学报, 1995, 33(4):290–314. Tong Yongsheng, Zheng Shaohua, Qiu Zhuding. Chinese Cenozoic era mammal age [J]. Vertebrata Palasiatica, 1995, 33 (4): 290–314 (in Chinese with English abstract).

The evolution of the depositional environment along the Gaozhuang Formation Section in Yushe Basin, Shanxi Province

QIAN Cheng, HAN Jian-en, YU Jia, HE Cheng-guang, ZHU Da-gang, SHAO Zhao-gang, MENG Xian-gang, WANG Jin

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on field geological survey and an analysis of such environmental indicators as grain sizes, magnetic susceptibility and carbonate content in combination with ESR age data provided by previous researchers, this paper discusses the variation of the depositional environment in the Gaozhuang Formation during the early Pliocene. The analytical results show that, in the early Pliocene (5.25~3.16 Ma), the Yushe Basin was mainly warm and wet in climate, with unsteady short-term drought, and its paleolake underwent three seasonal changes of the water level from steady increase to wavy increase. During 5.25~4.50 Ma, the basin evolved into the first strong rift stage, its paleolake underwent a change of its water level from steady increase to wavy increase, forming Taoyang Member strata. During 4.44~3.89 Ma, the basin evolved into the steady rift stage, its paleolake underwent a change of its water level from steady stabilization to wavy increase, forming Nanzhuanggou Member strata. During 3.81~3.16Ma, the basin evolved into the second strong rift stage, its paleolake underwent a change of its water level from steady increase to wavy balance, forming Culiugou Member strata, and the extreme dry climate occurred in 3.50~3.33Ma, after which the climate became warm and wet.

Key words: Gaozhuang Formation; Yushe Basin; depositional environment; Pliocene; Yushe Paleolake

About the first author: QIAN Cheng, male, born in 1985, master, mainly engages in the study of regional geology, sedimentary facies and paleoenvironment; E-mail: qch1985123@163.com.