

doi: 10.12029/gc20210507

赵红梅, 刘林敬, 赵华, 毕志伟, 王成敏, 杨劲松, 王利康, 芦岩. 2021. 滹沱河中游河道带 150 ka 以来沉积环境演化及其对气候变化的响应[J]. 中国地质, 48(5): 1408–1417.

Zhao Hongmei, Liu Linjing, Zhao Hua, Bi Zhiwei, Wang Chengmin, Yang Jinsong, Wang Likang, Lu Yan. 2021. Sedimentary environment evolution of the paleochannel in the middle reaches of Hutuo River since 150, 000 years and its response of climate change[J]. *Geology in China*, 48(5): 1408–1417(in Chinese with English abstract).

滹沱河中游河道带 150 ka 以来沉积环境演化 及其对气候变化的响应

赵红梅^{1,2}, 刘林敬^{1,2}, 赵华^{1,2}, 毕志伟^{1,2}, 王成敏^{1,2}, 杨劲松^{1,2}, 王利康^{1,2}, 芦岩³

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 河北省地质矿产勘查开发局国土资源勘查中心, 河北 石家庄 050081)

摘要:古河道记载了地质历史时期区域水系结构和沉积环境的演变信息,对复原古环境、水系变迁规律等具有重要理论意义。依托滹沱河冲洪积扇扇中古河道带上的一个第四纪钻孔(L2),基于详细的岩性特征、粒度参数和光释光年龄数据,文章深入分析了古河道发育的期次和时段,探讨了滹沱河中游古河道带 150 ka 以来的沉积环境演变过程及其对气候变化的响应。结果表明:研究区 150 ka 以来的沉积环境演化主要表现为三期古河道发育期与两期河流稳定期的交替,与深海氧同位素阶段及其指示的气候冷暖变化有很好的对应关系。其中三期古河道发育期分别对应于深海氧同位素第 2、4、6 阶段及其指示的气候冷期,两期河流稳定期对应于深海氧同位素第 3、5 阶段及其指示的气候暖期。第三期古河道(118~151 ka)是由距今 150 ka 的共和运动引起的构造抬升与倒数第二次冰期冷干气候的共同作用形成;第二期古河道(36~76 ka)是区域间歇性构造抬升与气候变化共同作用的结果;而第一期古河道(5~26 ka)则是末次盛冰期气候变化的产物。

关键词:沉积环境;古河道;气候变化;晚第四纪;水文地质调查工程;滹沱河;河北省

中图分类号:P534.63 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)05-1408-10

Sedimentary environment evolution of the paleochannel in the middle reaches of Hutuo River since 150, 000 years and its response of climate change

ZHAO Hongmei^{1,2}, LIU Linjing^{1,2}, ZHAO Hua^{1,2}, BI Zhiwei^{1,2}, WANG Chengmin^{1,2},
YANG Jinsong^{1,2}, WANG Likang^{1,2}, LU Yan³

(1. *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 2. *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, CGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 3. *Land and Resources Exploration Center of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Shijiazhuang 050081, Hebei, China*)

收稿日期:2019-09-17; 改回日期:2020-02-18

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201211079-01)、国家自然科学基金项目(41302191, 41807428)及河北省自然科学基金(D2020504008)联合资助。

作者简介:赵红梅,女,1981年生,高级工程师,从事第四纪地层与沉积环境研究;E-mail:zhmay81@126.com。

通讯作者:刘林敬,男,1982年生,高级工程师,从事植硅体与第四纪环境演变研究;E-mail:liulj206@126.com。

Abstract: Palaeochannel records the evolution information of regional drainage system structure and sedimentary environment in geological history, which is of great theoretical significance to the restoration of palaeoenvironment and the evolution law of drainage system. Based on a Quaternary borehole (L2) in the paleochannel of the alluvial and diluvial fan of Hutuo River, detailed lithological characteristics, grain size parameters and optical ages, the development periods and sedimentary environment evolution of the paleochannel in the middle of Hutuo River since 150,000 years and its response of climate change was discussed. The results show that the sedimentary environment evolution of the study area is mainly composed of three paleochannel development periods and two river stabilization periods since 150,000 years. It has a good correspondence with the deep-sea oxygen isotope stage and the climate change indicated. The three periods of paleochannel development correspond to the second, fourth and sixth stages of the deep-sea oxygen isotopes, and the cold climate respectively. Two river stabilization periods corresponds to the third and fifth stages of the deep-sea oxygen isotopes, and the warm climate respectively. The third paleochannel (about 151~118 ka) was formed by the combination of tectonic uplift caused by the republican movement 150 thousand years ago and the cold-dry climate during the penultimate glaciation. The second palaeochannel (about 76~36 ka) is the result of intermittent regional tectonic uplift and climate change. And the first palaeochannel (about 26~5 ka) was the result of climate change during the last glacial maximum.

Key words: sedimentary environment; palaeochannel; climate change; Late Quaternary; hydrogeological survey engineering; Hutuo River; Hebei Province

About the first author: ZHAO Hongmei, female, born in 1981, senior engineer, engaged in the study of quaternary stratigraphy and sedimentary environment; E-mail: zhmay81@126.com.

About the corresponding author: LIU linjing, male, born in 1982, senior engineer, engaged in phytolith and Quaternary environmental evolution; E-mail: Liulj206@126.com.

Fund support: Supported by the Public Welfare Research Project of Ministry of Land and Resources (No.201211079-01); National Natural Science Foundation of China (No.41302191, No.41807428); National Natural Science Foundation of Hebei Province (No. D2020504008).

1 引言

古河道记载了地质历史时期区域水系结构和沉积环境的演变信息,对复原古环境、水系变迁规律等具有重要理论意义(吴忱等,1991)。而且古河道中储藏着丰富的地下水资源,是大气降水、地表水、地下水的调蓄库容,研究古河道沉积环境演变是研究地下水的形成、循环和演化的重要基础,也是地下水回灌、地下水位降落漏斗修复(杨会峰,2021)等的研究基础。滹沱河冲洪积扇是华北平原重要的地下水补给区,该区域不同地质时期形成的古河道是不同深度含水层的重要组成部分。前人在该区进行了大量古河道的研究工作(陈中原等,1982;吴邦毓等,1983;朱宣清等,1985;何乃华等,1989;朱宣清等,1990;吴忱等,1991;黄惠玉,1992),但多以野外露头剖面的测量为重点,采集的环境和测年样品有限,研究分辨率不高,缺乏系统的年代框架,从而影响了对河道变迁历史复原及沉积环境重建的可靠性。本文依托滹沱河冲洪积扇扇中古河道带上

的1个第四纪钻孔(L2),基于详细的岩性特征、粒度参数和光释光年龄数据,深入分析了古河道发育的期次和时段,探讨了滹沱河中游古河道带 150 ka 以来的沉积环境演变过程,并与区域古气候环境演变进行对比,为该区古环境重建、水系变迁、地下水形成演化等提供基础资料。

2 研究区概况

研究区位于华北平原中东部石家庄地区,为滹沱河山前平原正定到藁城段。地貌上属于滹沱河冲洪积扇扇中部位。滹沱河平原属温带半湿润半干旱大陆季风气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。多年平均气温约 13 ℃,年降水量 450~750 mm,主要集中在 6—9 月。滹沱河是区内主要河流,发源于山西省繁峙县境内,经岗南、黄壁庄水库后流入平原区。在滹沱河的冲洪积作用下,本区第四系冲积层广泛分布,地形坦荡,微地貌略有起伏。区内滹沱河古河道密布,在晚第四纪有过频繁变迁(吴忱等,1991;吴忱,2001),主要岩性为含砾粗

砂、粗砂、中砂、细砂、粉细砂,是研究区浅部含水层的主要组成部分。

3 方法与结果

3.1 钻孔概况

第四纪钻孔(L2)位于河北省石家庄市藁城区梨园庄村烈士陵园西墙外(图1),地理坐标为:114°49′11.7″ E, 38°02′02.5″ N, H 52.8 m。钻孔深61.5 m,进行了全孔取芯和岩芯编录,采集光释光测年样品17个,粒度样品584个,粒度样品采样间距平均10 cm/个,光释光测年样品则根据岩性的变化来确定。所采集样品由中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室进行测试分析。

3.2 光释光测年

L2孔的地层年龄用光释光测年方法来确定。光释光测年是国际上广泛应用的测量晚第四纪特别是晚更新世以来沉积物年龄的方法。其测年的材料是石英、长石等第四纪沉积物中最常见的矿物,普遍易得,尤其适合于含碳质材料稀少的河流相沉积物。本孔共采集光释光样品17个,测试仪器为Daybreak 2200光释光测年系统,测量矿物为细颗粒石英(4~11 μm),部分样品测量矿物为粗颗粒石英(90~125 μm)。大部分样品采用细颗粒简单多片再生法获得等效剂量值,用饱和指数方法进行拟合,生长曲线图显示再生剂量点不太分散,生长曲线没有明显饱和,年龄数据可信(表1)。

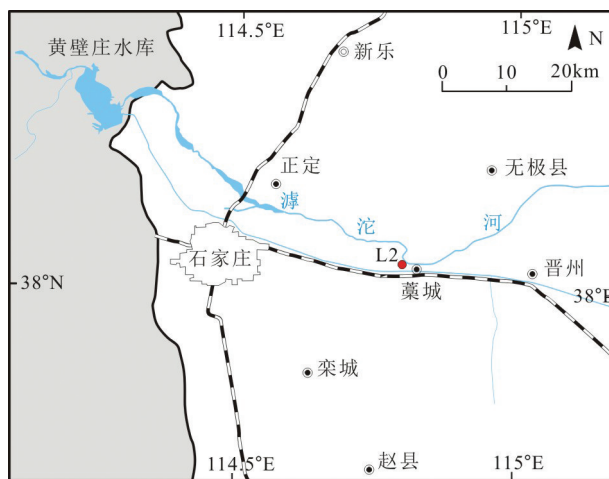


图1 钻孔地理位置

Fig.1 Location of the borehole L2

3.3 粒度分析

粒度参数是表征沉积物粒度分布的重要指标,它们从不同侧面反映了沉积过程的水动力条件及沉积环境的变化,进而帮助分析地层的沉积(亚)相及沉积环境。藁城市梨园庄L2孔共采集了584个粒度样品,采用激光粒度分析法进行测试分析。实验设备为英国Malvern公司出产的Mastersizer-2000型激光粒度仪,仪器测量范围为0.02~2000 μm,分辨率为0.01 φ,重复测量的相对误差<1%。L2孔的粒度参数变化曲线(包括平均粒径(M_z)、标准偏差(σ_1)、偏度(SK_1)、峰度(K_G))及不同粒度组分的百分含量变化(包括黏土(8~12 φ)、粉砂(4~8 φ)和砂(-1~4 φ))如图2所示。

4 分析与讨论

根据钻孔的地层年龄可知,该孔揭露了150 ka以来的沉积地层,涵盖了全新统、上更新统和中更新统顶部。地层岩性主要为不同粒级的砂,分选总体较差,为典型河流相沉积,部分层位粉砂、粉土或粉质黏土含量较高,反映了河道变迁、气候变化等沉积环境的变化。该孔剖面的地层层序及沉积特征(赵红梅等,2019)已在另一篇文章中详细讨论,这里不再赘述。根据钻孔沉积物的颜色、岩性、结构构造、沉积旋回等特征以及沉积物粒度参数变化(图2),将该孔地层剖面自下而上划分为5个组段。由光释光测年数据估

表1 L2孔沉积物光释光年龄

Table 1 Luminescence age of the sediments in the borehole L2

序号	野外编号	埋深/m	岩性	年龄/ka
1	L2-OSL-1	3.63	细砂	2.6±0.2
2	L2-OSL-2	11.05	粉砂	35.7±1.5
3	L2-OSL-3	13.33	细砂	37.5±1.4
4	L2-OSL-4	14.96	中砂	45.7±2.1
5	L2-OSL-5	18.05	粗砂	47.5±2.5
6	L2-OSL-6	20.67	细砂	66.6±3.0
7	L2-OSL-7	26.10	粉质黏土	79.3±3.4
8	L2-OSL-8	28.90	粉质黏土	93.1±4.9
9	L2-OSL-9	29.85	粉质黏土	97.6±5.0
10	L2-OSL-10	33.26	粉细砂	105.7±4.4
11	L2-OSL-11	34.78	中砂	106.1±4.9
12	L2-OSL-12	39.80	黏土质粉砂	117.0±4.8
13	L2-OSL-13	46.18	粗砂	121.7±4.9
14	L2-OSL-14	49.95	细砂	131.8±4.3
15	L2-OSL-15	53.05	粗砂	138.7±6.4
16	L2-OSL-16	55.59	粗砂	140.4±6.1
17	L2-OSL-17	58.85	粗砂	150.0±7.6

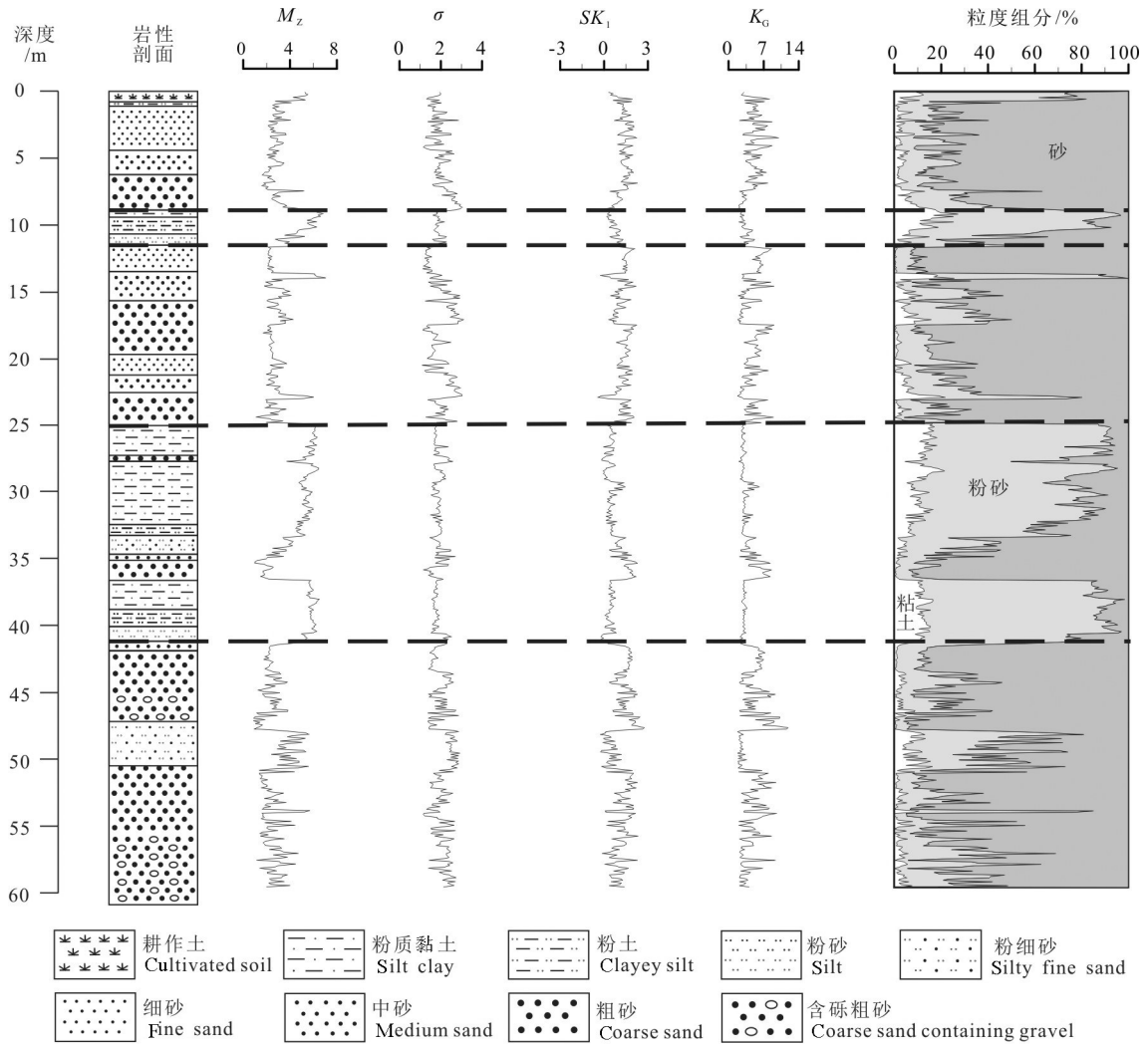


图2 L2孔剖面粒度参数变化
Fig.2 Variation of grain size parameters in borehole L2 section

算出各地层组段的界线年龄,在此年龄框架下分析不同组段所代表的沉积环境,并进行区域气候环境对比,探讨其可能的驱动机制。

第一组段(41.2~59.5 m, 118~151 ka):该组地层岩性为棕黄色含砾粗砂、粗砂和粉细砂,分选磨圆一般,钙质胶结明显,偶见淤泥质透镜体。沉积物粒度自下而上呈现明显的由粗变细的正韵律旋回,为典型河道相沉积。粒径均值平均为2.66 ϕ ,以中砂(28.46%)和粗砂(27.53%)为主。频率分布曲线显示以双峰为主,表明沉积物来源多样。概率累积曲线以三段式为主,包含滚动总体、跳跃总体和悬浮总体。多数样品滚动总体含量达到40%左右,粗截点在-1~0 ϕ ,斜率大,分选好。跳跃总体含量与滚动总体相当,但斜率小,分选差。悬浮总体占不

到20%,斜率小,分选差,细截点较大,在4~5 ϕ 。表明总体水动力条件很强,反映了古河道的沉积环境(图3)。

这一时段对应于深海氧同位素第6阶段,倒数第2次冰期, L_2 黄土发育期(刘嘉麒等,1994)。距今150 ka左右发生的共和运动致使青藏高原再次强烈隆升,达到现代高度;黄河溯源侵蚀切穿龙羊峡进入青海共和盆地,其低阶地T3形成(刘志杰等,2007);同时,冬季风变得更为强大,中国西北部整体变得更为干旱(李吉均等,1996)。受共和运动的影响,华北山地在此时期也发生了强烈的构造运动,表现为河流强烈切割形成“V”形峡谷,导致河流溯源侵蚀强度加大,湖水外泄,内陆水系变成外流水系,华北山地现代水系格局基本形成(吴忱等,1996);

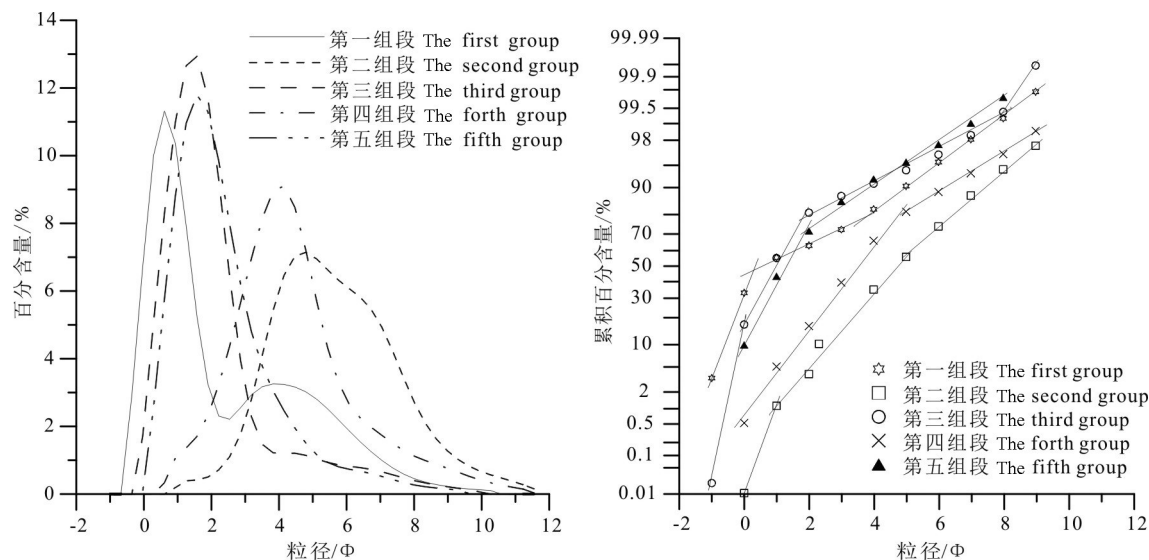


图3 L2孔不同组段典型沉积物样品粒度频率分布曲线和概率累积曲线

Fig.3 Frequency distribution and probability accumulation curves of samples from the different layers in borehole L2 section

太行山山前断裂带的保定—石家庄断裂在此时期有活动发生(高战武等,2014);滹沱河太行山山峡段形成了第三级阶地(程绍平等,1981);华北平原区气候干旱(范淑贤等,2009),河流作用增强,山体的抬升同时提供了大量的物质供给,河流的阶段性的输沙塑造了整个平原地貌(王强等,2004)。本文钻孔所在滹沱河中游河道带发生快速加积,沉积速率约为0.55 mm/a。总的来说,在此时段,构造抬升和海平面降低造成了地面坡度加大,河流侵蚀基准面下降,干旱的气候条件导致风化剥蚀作用加剧,物源更加充足,河流的进积作用增强,平原区河道被快速充填,形成了厚层叠置的河道相沉积,在堆积过程中河流又不断决口改道,形成了众多的砂质古河道,组成了华北平原的第I含水层组(张兆吉等,2009)。这一时期是本区第三期古河道发育期(图4),也可以称之为河流活跃期(吴忱等,1991)。

第二组段(25.0~41.2 m, 76~118 ka):该组地层岩性以棕黄色粉砂、黏土质粉砂、粉质黏土为主,结构密实,见多处锈染,局部含砂质透镜体;埋深36.6~34.6 m有一层2 m厚的砂层,为灰黄色粗砂、中砂和粉细砂,粗砂中含少量砾石,砾径1~3 cm。该段沉积物粒度与上一组段相比明显变细,粒径均值平均为5.64 φ。粉砂(71.62%)占绝对优势。总体分选较差,以正偏态为主,峰态较宽缓。频率分布曲线显示以单峰为主,表明沉积物来源单一。概率累积

曲线表现为两段或三段式,含极少量滚动总体,跳跃总体与悬浮总体含量差不多,且斜率相近,显示河流表面流速较大,使得二者几乎合二为一。总体反映了泛滥平原的沉积环境,中间的薄砂层则反映了一段短暂的河道沉积环境(图3)。

这一时段正值末次间冰期,对应于深海氧同位素第5阶段, S_1 古土壤发育期。末次间冰期总体气候温暖,亚洲夏季风强烈,在西藏纳木错地区发育了古大湖(赵希涛等,2003)。渤海湾沿岸普遍发生海侵(汪品先等,1981;王中波等,2020),这是在第四纪以来持续构造沉降的背景下,间冰期气候变暖造成海平面上升的结果。华北平原在此时段气候温暖湿润,年平均气温为15~16℃,植被景观以落叶阔叶林为主,相当于今日江南一带的景色(赵英时,1987)。河北唐山地区、邯郸地区整体气候温暖湿润,且有逐渐增温趋势,末期水热条件优于初期(肖景义等,2008,2010;李玉嵩等,2011)。滹沱河中游河道带这一时段的沉积环境主要受气候条件的控制,广泛发育细粒的泛滥平原沉积,沉积速率减缓,为0.38 mm/a。末次间冰期的气候包括5e、5c、5a三个明显暖时段和5b、5d两个冷时段(姚檀栋等,1997)。这在本孔的粒度曲线上也有所反映。末次间冰期初期(5e)是近150 ka以来全球最暖的时期,全球平均升温2~3℃,整体的气候状况与全新世间冰期相似(刘嘉麒等,2001)。青藏高原在此时段出现

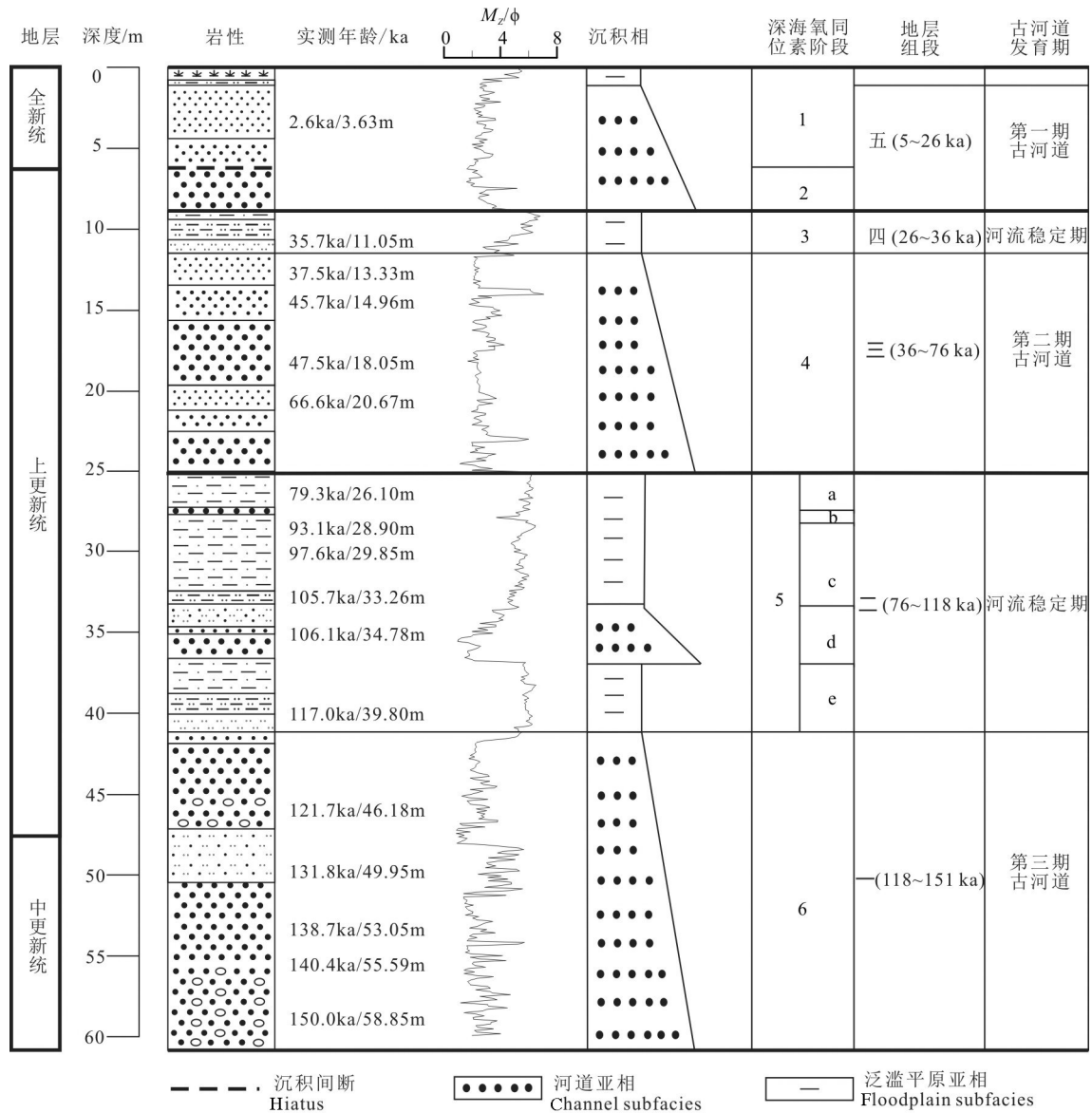


图4 L2孔沉积环境演变综合图(岩性图例同图2)
 Fig.4 Sedimentary environment evolution of borehole L2 section

最高湖面(132~112 ka)(郑绵平等,2006)。滹沱河中游河道带开始由河流活跃期转为河流稳定期,发育一层稳定的泛滥平原亚相沉积(图4)。随后在埋深33.26~34.78 m(105~106 ka),发育短暂的河道相沉积,在时段上应是对应于氧同位素5d亚阶段。5b亚阶段在粒度曲线里也表现为一层较薄的粗砂沉积。如此看来,河流相沉积的粒度参数不仅对于恢复古水文、古地理环境具有重要作用,而且在取样密度大的情况下也可以作为古气候变化的有效记录。然而由于河流相沉积经常存在沉积间断,因此年龄估算往往不够准确,只能作为参考。

第三组段(11.5~25.0 m, 36~76 ka):该组地层为由灰黄色粗砂、中砂和细砂组成的两个沉积旋回,结构松散,局部含较多砾石,砾径0.3~1 cm,磨圆较差,钙质含量高,弱胶结。沉积物粒度总体较粗,局部层段较细。粒径均值平均为2.82 ϕ ,以中砂(31.51%)和细砂(25.96%)为主。分选性差,多为正偏态,峰度变化范围大。频率分布曲线显示以双峰和多峰为主,表明沉积物源复杂。概率累积曲线为三段或多段式,滚动总体占10%~20%,分选好,粗截点在0 ϕ 附近,底流速度大。跳跃总体占60%左右,分选较好。悬浮总体含量20%左右,分选性差,

部分样品存在次总体。总体反映了水动力条件较强的河道沉积环境(图3)。

这一时段对应于深海氧同位素第4阶段,是末次冰期早期(刘嘉麒等,1994)。该时段的下限年龄刚好是晚更新世末次间冰期与末次冰期的界限年龄。从末次间冰期到末次冰期(对应MIS 4阶段)的转换是突然发生的,青藏高原古里雅冰心记录显示了从MIS 5a暖峰到MIS 4的3 ka时间里温度骤降 12°C (姚檀栋等,2001),全球冰量也显著增加(崔之久等,2011)。从本孔的粒度曲线上也体现了这一点。研究认为该冷期的出现与21 ka和41 ka的轨道周期均有关,是由太阳辐射驱动的温度变化(姚檀栋等,2001)。在此时段,中国东部平原及浅海陆架地区广泛发育埋藏古河道,是冰期海平面下降速度超过地壳运动下降速度的结果(吴忱等,1992)。华北平原在此时段气候温寒,年平均气温约 $8\sim 9^{\circ}\text{C}$,植被景观为以云杉、松为主的针阔叶混交林-草原,大致相当于今日沈阳以南的气候植被条件(赵英时,1987)。河北唐山地区经历晚更新世以来气候最为干旱的一个时期(李玉嵩等,2011),邯郸地区的孢粉资料也显示此时植被类型单调,气候寒冷干旱(肖景义等,2008,2010)。太行山南缘武家湾河流下游的平甸河发育了一期河流阶地,揭示了一次间歇性构造抬升(张蕾等,2013),可与本孔发育的厚层叠置河道相沉积对比。这一时期是本区第二期古河道发育期(图4),从以上分析来看,应是区域间歇性构造抬升与气候变化共同作用的结果。

第四组段(8.9~11.5 m, 26~36 ka):该组地层岩性为灰黄色粉砂、黏土质粉砂和粉质粘土,局部见水平层理,含泥质较高。沉积物粒度变细,粒径均值平均为 5.14ϕ 。以粉砂含量为主(55.65%),分选性较差,多为正偏态,峰度变化范围大。频率分布曲线显示以单峰为主,表明沉积物源单一。概率累积曲线包含跳跃和悬浮两个总体,其中跳跃总体分选一般,含量约为70%;悬浮总体分选较差,细截点在 $4\sim 5\phi$ 。总体反映了水动力条件较弱的泛滥平原沉积环境(图3)。

这一时段对应于末次冰期间冰阶,即深海氧同位素第3阶段(22~40 ka BP),是一个相对暖湿的阶段(刘东生等,1996)。青藏高原在此时段出现高湖面,整个高原为巨大的相互连通的泛湖系所覆盖,

总面积较现代湖泊大38倍(郑绵平等,2006)。华北平原在这一时期气候温和,孢粉组合以阔叶树种的桦、栎、榆为主,并有亚热带的枫香、漆等出现,植被景观为以阔叶树种为主的针阔叶混交林-草原景观(赵英时,1987;李玉嵩等,2011)。华北地区泥河湾盆地这一时期气候条件暖湿(Liu et al.,2014),渤海湾西岸在此时段发生大规模海侵(王强等,2008)。研究区这一时期由于气候温和湿润,降水量大,发育一层稳定的泛滥平原亚相沉积,部分地段发育浅湖沼相沉积(赵红梅等,2016)。与第二组段相似,这是一个河流稳定期,古河道不发育。

第五组段(0.7~8.9 m, 5~26 ka):该组地层为由灰黄色粗砂、中砂和细砂组成的一个沉积旋回,粗砂中见较多砂砾,砾径 $0.2\sim 0.7\text{ cm}$,磨圆较好,局部见团块状粉土和粘土透镜体,局部含钙质胶结。沉积物粒度总体较粗,局部层段较细。粒径均值平均为 2.72ϕ 。以细砂(30.43%)和中砂(31.14%)含量为主;分选性差且变化大,正偏态,峰态高窄。频率分布曲线显示以单峰为主。概率累积曲线多为两段式,跳跃总体含量一般约为70%,分选较好。悬浮总体含量30%左右,分选一般,细截点在 2ϕ 附近,河流表面流速较大。总体反映了水动力条件一般的河道沉积环境,三期河道沉积的水动力条件是逐渐变弱的(图3)。

这一时段正值末次盛冰期和全新世早期,对应于深海氧同位素第2阶段和第1阶段初期。末次盛冰期和全新世早期是个古河道发育期,中国各外流大河均有末次盛冰期的埋藏古河道,该时期的河流切入末次冰期间冰阶地层中,形成切割谷及谷底局部地区的深槽;中、晚期切割谷中填充了河床滞留物质和河床亚相的砂砾石、粗砂、中细砂;早全新世又有河流相砂体——粗砂、中细砂、细粉砂覆盖其上,共同构成了河道砂带(赵艳霞等,2013)。华北平原此时气候冷干,地层中出现披毛犀、纳玛象等表征寒冷气候条件的动物群(许清海等,1988),沉积物孢粉组合以含大量的早生草本植物花粉或孢粉贫乏为特征(童国榜等,1991)。研究区这一时期降水量减少,原有的一些浅湖洼面积缩小直至消失,转变为以河流沉积为主的古地理环境。本孔6.2 m处发育有河流冲刷面,并存在约6 ka的沉积间断(赵红梅等,2019),表明在此阶段后期滹沱河中游河道带以

河流冲刷侵蚀作用为主。全新世之后,冰消期开始,降水逐渐增多,河道重新在此处发育,河床也趋于稳定。之后一直到距今约 5 ka,河流补给充分,水动力条件较强,随之沉积了以中砂和细砂为主的河床相沉积。末次盛冰期与早全新世的河床相沉积共同组成了本区的第一期古河道。

5 结 论

滹沱河中游古河道带(L2)钻孔剖面记录了由河道亚相和泛滥平原亚相构成的沉积旋回。通过对该孔地层、沉积相、粒度参数特征的分析,结合获取的光释光年龄,取得如下主要认识:

(1)滹沱河中游古河道带 150 ka 以来的沉积环境主要表现为三期古河道发育期与两期河流稳定期的交替,且与深海氧同位素阶段有很好的对应关系。其中三期古河道发育期分别对应于深海氧同位素第 2、4、6 阶段,两期河流稳定期对应于深海氧同位素第 3、5 阶段。第三期古河道(118~151 ka)是由距今 150 ka 的共和运动引起的构造抬升与倒数第二次冰期冷干气候的共同作用形成;第二期古河道(36~76 ka)是区域间歇性构造抬升与气候变化共同作用的结果;而第一期古河道(5~26 ka)则是末次盛冰期气候变化的产物。

(2)河流相沉积的粒度均值也能够反映滹沱河中游地区 150 ka 以来的气候环境变化情况,基本可与深海氧同位素阶段进行对比,甚至在氧同位素第 5 阶段还可以进一步识别出 3 个暖期亚段与 2 个冷期亚段。说明河流相沉积的粒度参数不仅对于恢复制水水文、古地理环境具有重要作用,而且在取样密度大的情况下也可以作为古气候变化的有效记录。由于河流相沉积经常存在沉积间断,因此年龄估算往往不够准确,只能作为参考。

致谢: 审稿专家和编辑对本文的修改完善提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢!

References

Chen Zhongyuan, Yan Qinshang. 1982. The structural features of recent alluvial sedimentation of the Hutuo River on plain reach, Hebei Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, (3): 210–220 (in Chinese with English abstract).

Cheng Shaoping, Ran Yongkang. 1981. Hutuo River terraces in Taihang canyon section and Quaternary tectonic movement[J]. *Seismology and Geology*, (1):29–39 (in Chinese with English abstract).

Cui Zhijiu, Chen Yixin, Zhang Wei, Zhou Shangzhe, Zhou Liping, Zhang Mei, Li Chuanchuan. 2011. Research history, glacial chronology and origins of Quaternary glaciations in China[J]. *Quaternary Sciences*, (5): 749–764 (in Chinese with English abstract).

Fan Shuxian, Liu Haikun, Xu Jianming, Zheng Hongrui, Zhao Hua, Bi Zhiwei, Yang Zhenjing, Lin Fang, Zhang Jing. 2009. Palaeovegetation and environmental evolution in Hengshui district of Hebei Province since 3.50 Ma BP[J]. *Geoscience*, 23(1): 75–81 (in Chinese with English abstract).

Gao Zhanwu, Wu Hao, Li Guangtao, Cheng Li. 2014. Late Quaternary activity of the central– north segment of Taihang Mountain piedmont fault zone[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 9(2): 159–170 (in Chinese with English abstract).

He Naihua, Zhu Xuanqing, Liu Yixu. 1989. The paleochannel sediments and groundwater of the Hutuo River[J]. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, (1): 63–69 (in Chinese with English abstract).

Huang Huiyu. 1992. Composition and sedimentary environment of recent sediments of the Hutuo River on plain reach[J]. *Journal of Tongji University*, (4): 467–473 (in Chinese with English abstract).

Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, Zhu Junjie, Pan Baotian, Chen Huailu. 1996. Geomorphological evolution of the upper Yellow River in the Late Cenozoic and the uplift of the Qinghai– Tibet Plateau [J]. *Science in China(Series D)*, (4): 316–322 (in Chinese).

Li Yusong, Chen Jianqiang, Zhao Shuo, Wang Haiying, Li Xin. 2011. Sporopollen assemblages in Tangshan area since Late Pleistocene with a correlation to those in adjacent areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(2):178–188 (in Chinese with English abstract).

Liu Dongsheng, An Zhisheng, Sun Donghuai, Chen Mingyang. 1996. Preliminary comparison of the paleoclimate between the southern and northern hemispheres in recent 0.6 Ma [J]. *Science in China (Series D)*, (2): 97–102 (in Chinese).

Liu Jiaqi, Chen Tiemei, Nie Gaozhong, Song Chunyu, Guo Zhengtang, Li Kun, Gao Shijun, Qiao Yulou, Ma Zhibang. 1994. Datings and reconstruction of the high resolution time series in the Weinan loess section of the last 150,000 years[J]. *Quaternary Sciences*, (3): 193–202 (in Chinese with English abstract).

Liu Jiaqi, Ni Yunyan, Chu Guoqiang. 2001. Main palaeoclimatic events in the Quaternary[J]. *Quaternary Sciences*, (3): 239–248 (in Chinese with English abstract).

Liu Xingqi, Chi Zhenqing, Herzs Schuh Ulrike, Wang Yong, Ni Jian, Xu Qinghai. 2014. A MIS 3 charcoal and pollen record and quantitative precipitation inferences from the Jingerwa section of the Nihewan Basin, north– central China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 51(2): 211–221.

Liu Zhijie, Sun Yongjun. 2007. Uplift of the Qinghai– Tibet Plateau and formation, evolution of the Yellow River[J]. *Geography and Geo– Information Science*, (1): 79– 82 (in Chinese with English abstract).

Tong Guobang, Zhang Junpai, Yan Fuhua, Mai Xueshun. 1991. Sporopollen sequence and division of climatic period in the eastern North China Plain since Late Pleistocene[J]. *Seismology and Geology*,

- (3): 259–268 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, Cheng Xinrong. 1981. Strata of Quaternary transgressions in east China: A preliminary study[J]. *Acta Geologica Sinica*, (1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Liu Lijun, Wang Weidong, Xu Haizhen, Sun Weiyi. 2004. The mechanism of Quaternary palaeoenvironmental change in Circum-Bohai Sea region and North China Plain[J]. *Geological Survey and Research*, (3): 129–138 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhang Yufa, Yuan Guibang, Zhang Wenqing. 2008. Since MIS 3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the North Huanghua area, Hebei[J]. *Quaternary Sciences*, 28(1): 79–95 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongbo, Zhang Jiangyong, Mei Xi, Chen Xiaohui, Zhao Li, Zhang Yong, Zhang Zhixun, Li Xuejie, Li Rihui, Lu Kai, Sun Rongtao, Yang Shouye. 2020. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5 74–128 ka[J]. *Geology in China*, 47(5): 1370–1394(in Chinese with English abstract).
- Wu Bangyu, He Naihua, Shi Derong, Zhu Xuanqing, Huang Huiyu. 1983. Recent fluvial sedimentation of the Hutuo River, Hebei Province[J]. *Journal of Tongji University*, (2): 82–95 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chen, Zhu Xuanqing, He Naihua, Xu Qinghai, Yuan Wenying, Wang Zihui, Shi Derong, Zhao Mingxuan. 1991. Study on formation of paleochannels in North China Plain[J]. *Science in China(Series B)*, (2): 188–197 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chen, Xu Qinghai, Zhao Mingxuan. 1992. All major rivers in the world have buried paleochannels [J]. *Geography and Territorial Research*, (2): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chen, Ma Yonghong, Zhang Xiuqing. 1996. Palaeochannel and palaeodrainage patterns in the North China mountains[J]. *Geographical Research*, (3): 33–41 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chen. 2001. Changes of river system and new tectonic movement in North China mountainous area[J]. *North China Earthquake Sciences*, (4): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jingyi, Chen Jianqiang, Li Hui, Xu Zheping, Sun Gang, Niu Caixiang, Yang Guochen. 2008. Quantitative analysis of Quaternary sporopollen assemblages: A case study of hole HZ–S core in Handan, Hebei, China[J]. *Geological Bulletin of China*, (5): 599–604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jingyi, Chen Jianqiang, Xu Zheping, Cao Guangchao, Zhao Qinglin, Gao Liwen. 2010. Characteristics of vegetation fluctuation as well as consequent impact on climate since Late Pleistocene in Handan Area, Hebei[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1206–1212 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qinghai, Wu Chen, Yuan Wenying. 1988. Basic characteristics of natural environment evolution in Shijiazhuang Area at the end of Late Pleistocene [J]. *Geography and Territorial Research*, (1): 51–55 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huifeng, Cao Wengeng, Zhi Chuanshun, Li Zeyan, Bao Xilin, Ren Yu, Liu Futian, Fan Cunliang, Wang Shufang, Wang Yabin. 2021. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. *Geology in China*, 48(4): 1142–1155(in Chinese with English abstract).
- Yao Tandong, Shi Yafeng, Qin Dahe, Jiao Keqin, Yang Zhihong, Tian Lide, Thompson L G, Mosley–Thompson E. 1997. Climate change records since the last interglacial period in the Guliya ice core [J]. *Science in China(Series D)*, (5): 447–452 (in Chinese).
- Yao Tandong, Xu Boqing, Pu Jianchen. 2001. Climatic changes on the orbit and suborbit time scales recorded by the Guliya ice core on the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, (S1): 287–294 (in Chinese).
- Zhang Lei, Zhang Xujiao, Wu Fadong, He Zexin, Tian Jun, Yu Hang, Wang Chunlin, Liu Jianghong. 2013. River terraces development and significance of neotectonic movement on the southern margin of Taihang Mountains since Late Pleistocene[J]. *Geoscience*, 27(4): 791–798 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaoji, Luo Guozhong, Wang Zhao, Liu Chunhua, Li Yasong, Jiang Xianqiao. 2009. Study on sustainable utilization of groundwater in North China Plain[J]. *Resources Science*, 31(3): 355–360 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongmei, Liu Linjing, Zhao Hua, Bi Zhiwei, Wang Likang, Song Lei, Wang Chengmin, Yang Jingsong. 2016. Grain size character and sedimentary environment of Hutuo River paleochannel section[J]. *Geoscience*, (2): 485–492 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongmei, Liu Linjing, Zhao Hua, Bi Zhiwei, Wang Chengmin, Yang Jingsong, Wang Likang. 2019. High resolution stratigraphic sequence and sedimentary characteristics in Late Quaternary of Hutuo River paleochannel[J]. *Journal of Stratigraphy*, 43(4): 389–400 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Zhu Dagang, Yan Fuhua, Wu Zhonghai, Ma Zhibang, Mai Xueshun. 2003. Climatic change and lake–level variation of Nam Co, Xizang since the last interglacial stage[J]. *Quaternary Sciences*, (1): 41–52 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yanxia, Xu Quanhong, Liu Fangyuan, Qin Yanjie, Wu Chen, Chen Lijiang, Cui Junhui. 2013. Progresses of palaeochannel studies in China in the past 20 years[J]. *Progress in Geography*, (1): 3–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yingshi. 1987. Palaeoclimate variability of the North China Plain for the last 120000 years[J]. *Geographical Research*, (4): 54–61 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Yuan Heran, Zhao Xitao, Liu Xifang. 2006. The Quaternary pan–lake(overflow) period and paleoclimate on the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2):169–180 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xuanqing, He Naihua, Shi Derong, Wu Bangyu. 1985. Characteristics of sediment deposited in the lower reaches of the Hutuo River[J]. *Journal of Sediment Research*, (1):22–31 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xuanqing, He Naihua. 1990. Reconstruction of stream

- morphology by the method of size analysis in Hutuo River[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, (1):17-29 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 陈中原, 严钦尚. 1982. 滹沱河平原段现代沉积结构、构造特征[J]. 地理科学, (3): 210-220.
- 程绍平, 冉勇康. 1981. 滹沱河太行山山峡段河流阶地和第四纪构造运动[J]. 地震地质, (1): 29-39.
- 崔之久, 陈艺鑫, 张威, 周尚哲, 周力平, 张梅, 李川川. 2011. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, (5): 749-764.
- 范淑贤, 刘海坤, 徐建明, 郑宏瑞, 赵华, 毕志伟, 杨振京, 林防, 张静. 2009. 3.50 Ma BP 以来河北衡水地区古植被与环境演化[J]. 现代地质, 23(1): 75-81.
- 高战武, 吴昊, 李光涛, 程理. 2014. 太行山山前断裂带中北段晚第四纪活动性研究[J]. 震灾防御技术, 9(2): 159-170.
- 何乃华, 朱宣清, 刘益旭. 1989. 滹沱河古河道沉积和古河道地下水[J]. 河北省科学院学报, (1): 63-69.
- 黄惠玉. 1992. 滹沱河平原段现代沉积物的成分与沉积环境[J]. 同济大学学报(自然科学版), (4): 467-473.
- 李吉均, 方小敏, 马海洲, 朱俊杰, 潘保田, 陈怀录. 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (4): 316-322.
- 李玉嵩, 陈建强, 赵硕, 王海英, 李欣. 2011. 唐山地区晚更新世以来的孢粉组合特征及其与邻区的对比[J]. 地球学报, 32(2): 178-188.
- 刘东生, 安芷生, 孙东怀, 陈明扬. 1996. 最近 0.6 Ma 南、北半球古气候对比初探[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (2): 97-102.
- 刘嘉麒, 陈铁梅, 聂高众, 宋春郁, 郭正堂, 李坤, 高世君, 乔玉楼, 马志邦. 1994. 渭南黄土剖面的年龄测定及 15 万年来高分辨时间序列的建立[J]. 第四纪研究, (3): 193-202.
- 刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 2001. 第四纪的主要气候事件[J]. 第四纪研究, (3): 239-248.
- 刘志杰, 孙永军. 2007. 青藏高原隆升与黄河形成演化[J]. 地理与地理信息科学, (1): 79-82.
- 童国榜, 张俊牌, 严富华, 麦学舜. 1991. 华北平原东部地区晚更新世以来的孢粉序列与气候分期[J]. 地震地质, (3): 259-268.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 成鑫荣. 1981. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. 地质学报, (1): 1-13.
- 王强, 刘立军, 王卫东, 徐海振, 孙维义. 2004. 环渤海地区及华北平原第四纪古环境变迁机制[J]. 地质调查与研究, (3): 129-138.
- 王强, 张玉发, 袁桂邦, 张文卿. 2008. MIS 3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 28(1): 79-95.
- 王中波, 张江勇, 梅西, 陈晓辉, 赵利, 张勇, 张志珣, 李学杰, 李日辉, 陆凯, 孙荣涛, 杨守业. 2020. 中国陆架海 MIS5(74-128 ka) 以来地层及其沉积环境[J]. 中国地质, 47(5): 1370-1394.
- 吴邦毓, 何乃华, 施德荣, 朱宣清, 黄惠玉. 1983. 滹沱河现代沉积相标志研究[J]. 同济大学学报, (2): 82-95.
- 吴忱, 朱宣清, 何乃华, 许清海, 袁文英, 王子惠, 施德荣, 赵明轩. 1991. 华北平原古河道的形成研究[J]. 中国科学(B辑), (2): 188-197.
- 吴忱, 许清海, 赵明轩. 1992. 世界所有大河都有埋藏古河道[J]. 地理学与国土研究, (2): 29-34.
- 吴忱, 马永红, 张秀清. 1996. 华北山地的古河道与古水系[J]. 地理研究, (3): 33-41.
- 吴忱. 2001. 华北山地的水系变迁与新构造运动[J]. 华北地震科学, (4): 1-6.
- 肖景义, 陈建强, 李辉, 许哲平, 孙刚, 牛彩香, 杨国臣. 2008. 河北邯郸 HZ-S 孔第四纪孢粉组合的定量分析[J]. 地质通报, (5): 599-604.
- 肖景义, 陈建强, 许哲平, 曹广超, 赵青林, 高丽文. 2010. 邯郸地区晚更新世以来植被波动特征及其对气候变化的响应[J]. 沉积学报, 28(6): 1206-1212.
- 许清海, 吴忱, 袁文英. 1988. 晚更新世末期石家庄地区自然环境演变的基本特征[J]. 地理学与国土研究, (1): 51-55.
- 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 李泽岩, 包锡麟, 任宇, 柳富田, 范存良, 王树芳, 王亚斌. 2021. 近 40 年来华北平原地下水水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 48(4): 1142-1155.
- 姚檀栋, 施雅凤, 秦大河, 焦克勤, 杨志红, 田立德, Thompson L G, Mosley-Thompson E. 1997. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (5): 447-452.
- 姚檀栋, 徐柏青, 蒲健辰. 2001. 青藏高原古里雅冰芯记录的轨道、亚轨道时间尺度的气候变化[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (S1): 287-294.
- 张蕾, 张绪教, 武法东, 何泽新, 田珺, 于航, 王春林, 刘江红. 2013. 太行山南缘晚更新世以来河流阶地的发育及其新构造运动意义[J]. 现代地质, 27(4): 791-798.
- 张兆吉, 曾国中, 王昭, 刘春华, 李亚松, 姜先桥. 2009. 华北平原地下水资源可持续利用研究[J]. 资源科学, 31(3): 355-360.
- 赵红梅, 刘林敬, 赵华, 毕志伟, 王利康, 宋磊, 王成敏, 杨劲松. 2016. 滹沱河古河道剖面粒度参数特征及沉积环境[J]. 现代地质, (2): 485-492.
- 赵红梅, 刘林敬, 赵华, 毕志伟, 王成敏, 杨劲松, 王利康. 2019. 滹沱河古河道晚第四纪高分辨率地层层序及沉积特征[J]. 地层学杂志, 43(4): 389-400.
- 赵希涛, 朱大岗, 严富华, 吴中海, 马志邦, 麦学舜. 2003. 西藏纳木错末次间冰期以来的气候变迁与湖面变化[J]. 第四纪研究, (1): 41-52.
- 赵艳霞, 徐全洪, 刘芳圆, 秦彦杰, 吴忱, 陈利江, 崔俊辉. 2013. 近 20 年来中国古河道研究进展[J]. 地理科学进展, (1): 3-19.
- 赵英时. 1987. 华北平原 12 万年以来的古气候变化[J]. 地理研究, (4): 54-61.
- 郑绵平, 袁鹤然, 赵希涛, 刘喜方. 2006. 青藏高原第四纪泛湖期与古气候[J]. 地质学报, (2): 169-180.
- 朱宣清, 何乃华, 施德荣, 吴邦毓. 1985. 滹沱河下游沉积泥沙的特征[J]. 泥沙研究, (1): 22-31.
- 朱宣清, 何乃华. 1990. 运用粒度分析方法恢复河流地貌——以滹沱河为例[J]. 河北省科学院学报, (1): 17-29.