doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.011

冀中坳陷 HS1 钻孔沉积物粒度及其沉积环境

东王刚1,2,3,杨振京1,2*,毕志伟1,2,徐婉君4,宁凯1,2,赵元艺3

DONG Wanggang^{1,2,3}, YANG Zhenjing^{1,2*}, BI Zhiwei^{1,2}, XU Wanjun⁴, NING Kai^{1,2}, ZHAO Yuanyi³

1.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 正定 050800;

2.中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 正定 050800;

3.中国地质大学(北京),北京 100083;

4.河南省开封市地震台,河南开封 475004

1. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environment Evolution, China Geological Survey, Zhengding 050800, Hebei, China;

2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengding 050800, Hebei, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. Kaifeng Seismological Station, He' nan Province, Kaifeng 475004, He' nan, China

摘要:对冀中坳陷 HS1 钻孔沉积物进行起度分析,综合岩性、年代、生物标志等,探讨了 3.5 Ma BP 以来以冀中坳陷为代表的 华北平原坳陷区的岩相古地理演化过程。结果表明,在新构造运动长期震荡式下降和气候不断变化的条件下,经流水作用改 造依次经历了河流相与不稳定浅湖洼地相交替(上新世晚期)、河流相(早更新世)、河流相-片流相-短时洪泛相(中更新世)、 河流相和泛滥平原相交替(晚更新世)、泛滥平原相(全新世)5个沉积演化阶段,且沉积物所处环境的水动力条件不断减弱, 细颗粒组分不断增加。沉积物粒度颗粒组分含量与碳、氧同位素和孢粉所记录的气候变化具有同趋性,在寒冷干旱气候条件 下细颗粒组分含量增加,而在温暖湿润的气候条件下粗颗粒组分含量增加;介于二者之间的气候条件下,沉积物的粒径变化 较平缓,粒径区间范围较宽。粒度曲线反映的沉积环境的旋回性变化与孢粉、碳、氧同位素记录所划分的气候冷暖演化阶段 耦合性较好,也与华北地区其他钻孔同时期相关记录较一致,这对重建区域古地理环境具有重要意义。

关键词: 粒度; 沉积环境; 冀中坳陷; 气候变化

中图分类号:P512.2 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2023)02/03-0317-15

Dong W G, Yang Z J, Bi Z W, Xu W J, Ning K, Zhao Y Y. Grain-size variation and sedimentary environment of HS1 borehole sediments in Jizhong Depression. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3):317-331

Abstract: The grain size analysis of HS1 borehole sediments in the Jizhong Depression was carried out, and the lithofacies paleogeographic evolution process in the depression area of North China Plain represented by Jizhong Depression since 3.5 Ma BP was discussed by integrating lithology, age and biomarkers. The results demonstrate that under the conditions the long-term turbulent decline of the neotectonic movement and continuous climate change, the river facies and unstable shallow lake depression facies alternate (Late Pliocene), river facies (Early Pleistocene), river facies, sheet flow facies and short-term flood facies (Middle Pleistocene), river facies and flood plain facies alternate (Late Pleistocene), flood plain facies (Holocene) five sedimentary evolution stages, and the hydrodynamic conditions of the sediment environment are weakening, and the fine particle components are increasing. The grain size fraction content of sediments was consistent with the climate change recorded by carbon-oxygen isotope and pollen. The acceptable grain

资助项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所项目《我国北方水循环区域特征及其对全球变化的响应研究》(编号:200312300002) 和河北省自然科学基金项目《微塑料记录的气候变化背景下的白洋淀地区人类活动特征及其环境响应》(编号:D2021504016)

作者简介:东王刚(1996-),男,硕士,矿物学、岩石学、矿床学专业,从事第四纪地质与环境研究。E-mail:dongwanggang61@163.com * **通信作者:**杨振京(1966-),男,研究员,从事第四纪地质与环境和第四纪孢粉学研究。E-mail:yangzhenjing1966@163.com

收稿日期:2021-08-04;修订日期:2022-12-28

fraction content increased under cold and dry climate conditions, while the coarse grain fraction content increased under warm and humid climate conditions.Under the climate conditions between them, the change of sediment particle size is relatively gentle, and the particle size range is vast.The cyclic variation of the sedimentary environment reflected by the grain size curve is well coupled with the cold and warm evolution stages of climate divided by pollen and carbon and oxygen isotope records.It is also consistent with the relevant documents of other boreholes in the same period in North China, which is of great significance to reconstruct the paleogeographic environment in the region. **Key words:** grain size; sedimentary environment; Jizhong Depression; climate change

冀中坳陷为华北平原内呈 NNE 向展布的三级 构造单元(张文朝等,2001),地处中朝准地台华北 断坳,属中、新生代沉积(钱永等,2014),在地貌类 型上表现为太行山山前冲洪积平原的扇缘(吴忱, 2008)和以洪积、湖积为主的中部平原(李华梅等, 1977)的结合部位。第四纪,冀中坳陷继承了新近 纪构造运动的特点,处于盆地热沉降阶段。第四纪 地层分布广泛,平行不整合在古近系-新近系之 上,堆积物厚度大,成因类型复杂,蕴含了丰富的环 境演化信息。早在20世纪50-60年代,已有学者 针对冀中坳陷内第四纪沉积物的性质(熊毅等, 1957)、颜色(丁国瑜等,1964)及滹沱河现代沉积物 的成分与沉积环境(黄惠玉,1992)进行了初步研 究。后续学者借助不同指标,对区内的第四纪研究 进一步细化,主要集中于地层划分与对比(张静等, 2009; 赵红梅等, 2014; 卢海峰等, 2014)、古植被恢 复(许清海,1994;范淑贤等,2009),以及利用碳、 氧、氘同位素记录定量重建古气候(毕志伟等, 2012;牛宏等,2016)等方面。关于沉积物粒度方面 的资料更稀少,近年赵红梅等(2019)对滹沱河古河 道的晚第四纪地层进行了高分辨率研究,牛宏等 (2016) 仅对衡水地区咸水层分布区的沉积环境与 咸水形成期的古气候特征进行了研究,且无具体的 时间尺度。但前人研究成果证明,第四纪沉积物的 形成与分布及其成因机制除主要与地壳运动(升 降、拉伸挤压)有关外,还与气候变化等因素直接相 关(许洪才,2018)。

总之,冀中坳陷在油气勘探方面具有天然的优 越性(沈华等,2021),区内研究资料多集中于古近 纪(纪友亮等,2009),关于新近纪—第四纪尺度的 研究资料较匮乏。早期研究区的第四纪研究多针 对水文地质钻孔,时间序列短,古环境古气候方面 的长时间尺度系统性研究很少。本文在前人研究 的基础上选用冀中坳陷 HS1 钻孔,进行垂向上的粒 度参数变化及沉积环境演化分析,揭示该地区第四 纪长时间尺度上粒度记录的周期性变化及其与其 他指标所显示的气候变化之间的关系,进一步探究 以冀中坳陷为代表的华北平原坳陷区上新世晚期 以来的沉积演化过程,对重建古地理环境具有重要 意义。

1 研究区概况

冀中坳陷为新生代渤海湾盆地的一个次级构 造单元,在构造位置上西邻太行山、北依燕山、东至 沧县隆起,南抵邢衡隆起,位于 NNE 向(以太行山 为代表)和近 EW 向(以燕山为代表)构造带的交汇 处,地质构造较复杂。自然地理上位于华北平原西 北部,行政区域上主体在河北省境内,地跨北京、天 津市。区内的主要沉积相为河流相夹浅海相地层, 由下向上可分为更新统和全新统,更新统自下而上 分为固安组、杨柳青组、欧庄组等;全新统自下而上 分为杨家寺组、高湾组和岐口组。区内属大陆季风 控制的半干旱、半湿润型气候,全年四季分明,年平 均气温在-23~42℃之间,植被带以东部暖温带落叶 阔叶林棕壤地带和暖温带森林草原褐土地带为主。 本次研究的 HS1 孔(图 1) 在构造上位于以两侧具 有不同的构造样式和沉积特征的衡水调节带(粱富 康等,2013)为界的冀中坳陷中部地区,为第四纪科 学钻孔。

2 分析方法

HS1 钻孔位于冀中坳陷中部,衡水深州市护架 池乡南张家庄村东南 150 m 处,地理坐标为东经 115°40′47.7″、北纬 37°54′23.3″,井口海拔标高 20 m,钻孔深 600 m。依据该孔岩心地层的颜色、岩 性、岩相、结构构造、沉积韵律特征及层间接触关 系,共划分出 178 个岩性层,采集粒度样品 561 个, 取样间距不等,大致为 0.5 m 采取 1 个样品。

粒度测试分析在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成。具体方法如下:取3~5g样品加入100mL烧杯中,加入适量浓度为3.8mol/L的过氧化氢溶液去除有机质,无气泡产生后加水静置



图 1 冀中坳陷区域构造及 HS1 钻孔位置(据李理等,2017 修改) Fig. 1 Regional structure and HS1 borehole location in Jizhong Depression

12 h;除去上层废液后,加入适量浓度为 3.2 mol/L 的 稀盐酸进行水浴,加热去除碳酸盐,至无气泡产生后加 蒸馏水静置 24 h;去除上层清液后加入 0.5 mol/L 的六 偏磷酸钠分散剂,超声震荡 10 min 后在 Mastersize -2000 型激光粒度仪上机测试即可。本次粒度测试 平均偏差小于 1,平均残差小于 0.8,测试结果可靠。

3 分析结果

3.1 钻孔年代地层

HS1 钻孔的地层年龄依据古地磁测年和光释 光(OSL)测年方法综合确定,共采集古地磁样品 1095 块和光释光样品 12 个。

光释光测年采用细颗粒简单多片方法(王旭龙 等,2005),并基于沉积物含水量对环境剂量率的影 响(刘海金等,2021),对α系数采用经验值0.04进 行计算。结果显示,大部分样品的生长曲线良好, 数据点无明显分散现象,说明释光信号及测片之间 的质量差异得到了较好的校正,所测样品年龄值基 本可靠。基于 R 语言的 Clam 年龄-深度模型 (Blaauw,2010)绘制年龄-深度变化曲线(图 2),显而



易见,年龄随深度基本呈线性增加,局部疑似发生 地层扰动。8.75 m 处对应的光释光测年结果为 11.8±0.2 ka BP,为晚更新世和全新世界线,晚更新 世与中更新世的界线为 39.61 m,对应的光释光测 年结果为 120.2±6.8 ka BP(表 1;图 2)。

古地磁测年结果表明(图 3), B/M 界线在 112 m 处,之上为棕红色粘土,之下为具有锈黄色斑染 的浅棕黄色粘土及粉细砂:M/G 界线深度为 324.91 m,之上为含砂粘土,下部为棕红色粘土,其分别对 应沉积年龄 0.78 Ma BP 和 2.58 Ma BP。根据外插 法推算,终孔处地层对应的沉积年龄约为 3.50 Ma BP。在松山反向极性时内,哈拉米洛极性亚时(J) 出现在 131.36~143.36 m 段, 对应的古地磁年龄分 别为 0.99 Ma BP 及 1.07 Ma BP。187.54~230.52 m 的正极性段可以和奥杜威极性亚时(O)对应,其顶 界年龄为1.77 Ma BP,底界为 1.95 Ma BP。留尼旺 R1 和留尼旺 R2 分别出现在 245.77~254.07 m 及 280.38~292.95 m 段,其界线年龄分别为 2.01~2.04 Ma BP 和 2.12~2.14 Ma BP。在高斯极性时的 430.89~443.10 m处,为凯纳极性亚时(K),其年龄界 线为3.04~3.11 Ma BP。448.15~487.60 m 段为马莫 斯极性亚时(Ma),对应的年龄为 3.22~3.33 Ma BP。

3.2 钻孔粒度剖面特征

粒度参数是综合反映沉积物粒度特征及沉积 环境的量化指标(李艳红等,2014;Wu et al,2020; 张亮等,2021)。本次采用矩值法(卢连战等,2010) 计算 HS1 孔粒度参数,并绘制平均粒径(MZ)、标准 差(σ1)、偏度(SK1)、尖度(KG)的垂向变化曲线 (图 3)。本次统计不同粒度组分的百分含量变化, 包括粘土(8~12 Φ)、粉砂(4~8 Φ)、细砂(2~4 Φ)、中砂(1~2 Φ)、粗砂(-1~1 Φ),绘制曲线时为 便于分析,计算了粘土(8~12 Φ)和砂(-1~8 Φ)的 百分比含量垂向变化(图 3)。

HS1 钻孔沉积物平均粒径范围为-0.94~6.56 Φ,平均粒径值为 3.31 Φ,平均砂含量为 31.68%,粘 土含量为 15.90%,表明岩性以砂为主,含少量粘土 组分;标准偏差范围为 0.49~3.27,说明沉积物分选 不一,从好到差都有;偏度为-1.56~3.22,同样变化 较大;尖度为 1.18~19.83,峰态中等—非常宽,变化 范围很大。

综合沉积物的颜色、岩性、结构构造、岩相组 构、沉积旋回、接触关系特征及其形成时代、生物标 志,结合粒度分析数据,将衡水钻孔剖面由上而下 划分为5个大的沉积阶段(图3)和16个次沉积组 段(图4),各组段的特征分述如下。

V-3 阶段(561~507 号样,599.20~541.50 m): 该组段平均粒径变化范围为-0.06~6.55 Φ,平均值 为 4.00 Φ,粘土含量平均值为 18.91%,砂含量平均 值为18.57%,沉积物主体组分从粘土到细砂均有出 现,总体变化较大且旋回性不明显。标准偏差为 1.21~2.12,平均值为 1.62,表明分选性较差。偏度 为-1.56~1.69,平均值为 0.16,频率曲线单峰正、负偏态都

Table 1 USL ages and dating parameters of borenoie 1151									
样品编号	α 系数	深度/m	ED/Gy	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	年龄/ka		
OSL-1	0.04	4.4	7.48 ± 0.60	2.85±0.14	14.8±0.30	2.45 ± 0.07	1.8 ± 0.2		
OSL-2	0.04	5.4	7.65 ± 0.54	2.23 ± 0.11	11.4±0.23	1.83 ± 0.05	2.2±0.2		
OSL-3	0.04	5.9	13.03±0.03	2.31 ± 0.12	11.0±0.22	1.76 ± 0.05	3.9±0.2		
OSL-4	0.04	7.1	18.10±0.79	2.60±0.13	12.4 ± 0.25	2.24 ± 0.07	4.5±0.3		
OSL-5	0.04	9.3	44.88±2.48	2.20 ± 0.11	9.89 ± 0.20	1.62 ± 0.05	14.3±1.1		
OSL-6	0.04	15.7	136.57±7.05	2.60 ± 0.13	9.55±0.19	1.62 ± 0.05	43.6±3.1		
OSL-7	0.04	19.6	173.65 ± 6.40	2.28 ± 0.11	11.4±0.23	1.82 ± 0.05	51.4±3.2		
OSL-8	0.04	23.5	294.90±13.44	2.27 ± 0.11	12.4 ± 0.25	1.63 ± 0.05	86.9±5.9		
OSL-9	0.04	28.4	314.13±7.55	3.18±0.16	12.4 ± 0.25	1.62 ± 0.05	87.3±4.8		
OSL-10	0.04	32.2	287.46 ± 5.89	2.80 ± 0.14	13.2±0.26	2.00 ± 0.06	75.8±4.1		
OSL-11	0.04	37.3	454.09±13.32	2.69±0.13	11.7±0.23	1.95 ± 0.06	117.8±6.8		
OSL-12	0.04	40.9	455.06±11.02	2.49 ± 0.12	11.2 ± 0.22	2.04 ± 0.06	121.6±6.8		

表 1 HS1 钻孔光释光测年结果及参数 Table 1 OSL ages and dating parameters of borehole HS



Fig. 3 Vertical variation of stratum and grain size parameters of HS1 borehole

有,且有双峰态出现,说明沉积物多含粗细粒所占 比例不同的2种组分;尖度为1.84~2.68,平均值为 2.07,峰态中等—非常宽。上述均表明,该时期水动 力条件强弱不等,沉积环境变化大,不稳定。

V-2 阶段(506~359 号样,539.95~364.84 m): 该组段沉积物平均粒径为-0.64~6.43 Φ,平均值为 3.49 Φ,与 V-3 组相近,但韵律性明显,由 5 个旋 回组成,粘土、细粉砂与中粗砂互层,整体平均砂 含量也比 V-3 组增加 11.3%,粘土含量略减少。 标准偏差为 0.49~2.68,平均值为 1.69,分选性较 好—差,局部差异性明显。偏度为-1.20~2.08,平 均值为 0.29;尖度为 1.18~8.20,平均值为 3.17,即 频率曲线形态、类型与上组段相近,但相应主体组 分含量更高,颗粒粗细更分明。表明至少存在2 种不同强弱水动力的沉积环境,且呈现周期性交 替出现。

V-1 阶段(358~325 号样,364.05~323.20 m): 该组段平均粒径为-0.94~5.52 Φ,平均值为 2.76 Φ,沉积物粒径更粗,平均砂含量比 V-2 组增加 10.94%,粘土含量显著降低 4.49%。标准偏差为 0.68~3.27,平均值为 1.78,分选性较 V-2 阶段稍 差,但明显好于 V-1 阶段。偏度为-0.78~2.29,平 均值为 0.43;较 V-2 组和 V-3 组正偏移量多,即主 体组分颗粒略粗;尖度为 1.67~9.77,平均值为3.73,





图 4 HS1 钻孔各沉积组段部分样品频率分布曲线(图例中数字为样号) Fig. 4 Frequency distribution curve of some samples in each sedimentary section of HS1 borehole

更宽阔。频率曲线单峰、双峰交替出现,具有一定的旋回性。沉积环境变化较大,十分不稳定。

Ⅳ-6阶段(324~284号样,321.20~274.60 m): 该组段沉积物平均粒径为-0.72~6.07 Φ,平均值为 3.27 Φ,由 2 个较大的旋回组成,岩性变化为粘土、 细粉砂—中粗砂—粘土、细粉砂—中粗砂,粒径变 化总体上自下而上越来越细。标准差为 1.03~ 2.53,平均值为 1.73,分选性差。频率曲线以双峰态 为主,前二众数粒级分别为粘土和粉、细砂,偏度为 -0.09(283号样)、0.08(293号样),近乎对称;单峰 态曲线(295号样)第一众数粒级为中、粗砂,偏度为 1.58,极正偏态;尖度为 1.99~13.54,整体峰态宽— 非常宽,且单峰曲线较双峰宽。整体水动力条件较 强,河流相、泛滥相交替出现。

Ⅳ-5阶段(283~248号样,274.05~228.24 m):
该组段沉积物平均粒径为-0.67~5.91 Φ,平均值为
2.15 Φ,岩性以细中砂为主,平均含量占 42.74%,夹
粘土条带。标准差为 1.04~2.97,平均值为 1.68,较
№-6 组粒径细但分选性同样很差,波动小。偏度为
-0.70~2.53,尖度为 1.96~11.94,频率曲线以单峰
宽态、正偏态为主。水动力条件较强,河流相沉积。

Ⅳ-4阶段(247~235号样,227.35~216.10 m): 该组段沉积物平均粒径为3.25~5.87 Φ,平均值为4.71 Φ,岩性以粘土、粉砂为主,双众数分布。粘土含量平均值为28.86%,较前几组略有增加,而砂含量平均值为12.96%,明显降低。标准差为1.55~ 2.41,平均值为2.08,分选性较差。频率曲线以双峰态为主,偏度为-0.56~0.13,平均值为-0.23,以负偏态为主;尖度为1.92~3.20,平均值为2.47,曲线峰态宽但变化范围变小,基本无变化。水动力条件弱但相对稳定,且存在2种物源。

Ⅳ-3阶段(234~191号样,214.50~184.50 m): 该组段沉积物平均粒径为-0.73~6.09 Φ,平均值为 2.30 Φ,以细砂、中砂为主,夹粘土条带。标准差范 围处于0.71~2.92之间,平均值为1.79,分选性中等 偏差。频率曲线以单峰态为主,含粘土组分大于 30%的样品为双峰态,偏度为-0.63~2.55,平均值为 0.70,正偏态为主,部分粘土含量较高的样品为负偏 态,判断其成因可能与风成有关;尖度为1.62~ 19.83,平均值为4.80,峰态非常宽且变化范围很大。 总体沉积环境为河流相。

Ⅳ-2阶段(190~171号样,183.90~168.10 m):

该组段沉积物平均粒径为 3.02~5.99 Φ,平均值为 4.81 Φ,以粘土、细粉砂为主,粉砂含量平均值为 66.24%。标准差介于 1.19~2.46 之间,分选性较差 但变化范围小。频率曲线以双峰态为主,偏度为 -0.34~0.43,平均值为 0.07,呈近对称分布。尖度 为 1.96~3.05,平均值为 2.43,峰态很宽但变化较 小。总体水动力条件较弱,指示泛滥平原、决口扇 沉积。

Ⅳ-1阶段(170~117 号样,167~111.80 m):该 组段沉积物平均粒径为-0.73~5.22 Φ,由 5 个小旋 回组成,自上而下岩性变化为粉砂—中砂—粉砂— 中粗砂—粗粉砂—中粗砂—粉砂—中砂—细粉 砂—细中砂,粒径变化总体为逐渐变粗又变细。标 准差在0.77~2.84 之间,平均值为 1.70,分选性中 等—差。频率曲线以双峰为主,偶见多峰态。偏度 为-0.74~3.22,平均值为 0.74,正偏态为主;尖度在 1.79~16.43之间,平均值为 4.84,峰态宽且变化范围 非常大。本阶段水动力条件由强变弱,河流相发育。

Ⅲ-5阶段(116~102号样,111.50~99.78 m): 该组段沉积物平均粒径为2.74~5.82 Φ,平均值为 4.19 Φ,粉砂平均含量高达70.82%,为第一众数粒 级,粘土含量占30.40%,局部有粘土条带。标准差 为1.17~2.55,平均值为1.70,分选性较差。频率曲 线以单峰态为主,偏度为-0.81~0.76,平均值为 0.02,且大多数与之接近,即为近正态分布;尖度为 2.18~3.91,平均值为2.63,峰态宽且变化很小。总 体以片流相、河流相为主,短时洪泛相。

 Ⅲ-4阶段(101~90号样,98.90~89.30 m):该 组段沉积物平均粒径为0.36~4.60Φ,平均值为2.86
 Φ,岩性以粉砂(56.07%)、极细砂(15.82%)、细砂(12.27%)为主,粘土含量一般小于10%。标准差为1.15~2.32,平均值为1.74,分选偏差。频率曲线主 要为单峰态,偏度为0.13~1.78,平均值为0.58,正 偏态;尖度为1.89~6.24,平均值为2.89,峰态宽。
 整体水动力条件较强,为河流相沉积。

Ⅲ-3阶段(89~70号样,88.75~70.40 m):该组段沉积物平均粒径为3.26~5.75Φ,平均值为4.18Φ,粉砂组分占76.27%。标准差为1.20~2.61,平均值为1.63,分选性一般。频率曲线以单峰态为主,偏度为-0.35~0.54,平均值为0.17,上部以负偏态为主,下部以正偏态为主;尖度1.95~3.34,平均值为2.49,峰态宽且变化范围较小。水动力条件变弱,以

决口扇、泛滥平原相为主。

Ⅲ-2阶段(69~64 号样,69.85~65.60 m):该组 段沉积物平均粒径为 0.21~2.39 Φ,平均值为 1.46 Φ,不同于Ⅲ大段其他组段的是,其第一众数粒级粉 砂组分平均含量显著降低至 27.74%,而细砂 (26.74%)、中砂(21.99%)次众数组分平均含量略 增加。标准差为 1.19~2.38,平均值为 1.81,分选性 一般。频率曲线以单峰正偏态为主,偏度范围为 0.31~2.07,平均值为 1.03;尖度为 1.97~9.68,平均 值为 4.38,峰态宽且变化范围大。水动力条件变强, 为河流相沉积。

Ⅲ-1阶段(63~41 号样,65.20~40.50 m):该组 段沉积物平均粒径为0.27~5.34 Φ,平均值为3.76 Φ,第一众数粒级同为粉砂(63.12%),这也是整个 Ⅲ大段的共同之处,第二众数为粘土(25.46%)。标 准差为1.25~2.53,平均值为1.85,分选性较差。频 率曲线单峰、双峰态交替出现,偏度-0.15~1.38,平 均值为0.45,正偏态为主;尖度为1.69~4.78,峰态 宽但变化范围再次减小。整体水动力条件一般,以 洪泛平原相为主,57~59 号样品中粗砂含量较高, 可达34%~59%,反映了短时期的河流相沉积。

Ⅱ阶段(40~20 号样,39.61~8.75 m):该组段 沉积物平均粒径为0.90~4.21 Φ,平均值为3.03 Φ, 岩性自上而下逐渐变粗,上部以粉砂为主,下部过 渡到以极细砂、细砂、中粗砂为主。分选性一般,标 准差为1.38~2.39,平均值为1.74。频率曲线以单 峰态为主,偶见双峰态,偏度-0.45~1.45,平均值为 0.45,为正偏态为主;尖度为2.15~5.26,平均值为 2.79,峰态较宽。整体反映水动力条件不断减弱,由 河流相向泛滥平原相转变的沉积环境。

I 阶段(19~1 号样,8.75~0 m):该组段沉积物 平均粒径处于3.76~6.56 Φ之间,平均值为4.92 Φ, 岩性以粉砂为主,平均含量占74.84%,中粗砂含量 普遍较低,不足 1%。标准差为 0.94~1.87,平均值 为 1.40,分选性一般。频率曲线单峰、双峰交替出 现,偏度范围为-0.85~0.47,平均值为 0.01;尖度为 2.12~4.75,平均值为 2.82,峰态宽。双峰态样品的 2 个众数为粉砂级和粘土级,其中第一众数为粘土 级的样品(如 10、11 号样),其偏度均为负值。总体 水动力条件一般,为泛滥平原、决口扇沉积环境。

4 讨 论

4.1 钻孔岩相古地理演化特征

不同地质时期的古地理面貌,均是地质内营力 (主要是构造运动)、外营力(风化剥蚀,侵蚀堆积) 相互作用的结果。新生代地层沉积之前,冀中坳陷 的基底轮廓已基本成形(李玉帮等,2021)。而第四 纪是气候发生冷、暖交替剧烈变化的时期,其构造 格局和地貌景观在继承新近纪的基础上也会有新 的发展。综合粒度剖面及典型代表概率累积曲线 (不同时期类型见表 2,曲线形态见图 5),进一步分 析 HS1 钻孔不同时期的岩相古地理演化过程。

冀中坳陷第四纪时期继承了新近纪构造运动 的特点,以垂向运动和断裂活动为主(陈望和等, 1987),周边隆起断块距离抬升,由北西向南东方向 掀斜,使区内河流向渤海汇集,坳陷区处于不断沉 降的过程中,塑造了特有的第四纪地层粒度特征 (邵时雄等,1984)。不同时期古地理演化特征 如下。

上新世(321.72~600.00 m),湖泊相与河流相 交替发育,且不同时期变化较快。早期(524.45~ 600.00 m)沉积物上部为厚层状灰黄色细砂、粉砂、 粗中砂互层,下部为紫红色、棕红色、棕褐色、灰褐 色、灰棕色、灰绿色粘土、亚粘土、亚砂土,少夹灰黄 色、黄色、灰绿(次生)色细砂、中砂层,局部含钙质 结核、铁锰质小核,见古土壤层。以湖相沉积为主,

表 2 HS1 钻孔不同时期典型概率累积曲线类型(数字代表样品编号)

Table 2 Types of typical cumulative probability curves for HS1 borehole in different periods

概率累积曲线类型	细一段型	粗一段型	二段型	粗二段型	三段型	多段型
沉积环境	浅湖洼地、河漫滩、湖泊	深大河流河道中心	河流相	典型河流相	泛滥平原	复杂地质营力环境
全新世(Qh)	16		8	11		
晚更新世(Qp3)	21	40		34		
中更新世(Qp ₂)	48	57	90			
早更新世(Qp1)	213	265	252	301	236	186
上新世(N ₂)	409	494	486	424	385	



间有河流相沉积。在 537~540 m 发现一层土星介 Ilyocypris-Candoniella 为主的化石组合,代表温暖的池 沼、河流相沉积环境。而 494 号样(523.04 m) 概率 累积曲线呈粗一段型(图 5-b),粒径区间为1.5~2.5 Φ,总体曲线斜角大于 75°。频率曲线呈单峰态,标 准偏差 0.49, 分选性极好, 偏度为-0.43。缺失牵引 组分和悬浮组分,代表了水动力条件稳定且很强的 深大河流河道中心附近位置的沉积环境。424号样 (446.56 m)概率曲线呈粗二段型(图 5-d),跳跃组 分约占 70%;悬浮组分约占 30%,截点 1Φ 左右,跳 跃总体曲线斜角约 65°。频率曲线呈单峰态,标准 偏差为 1.54, 偏度 1.45 左右。曲线呈明显的 2 段, 缺失推移组分,悬浮组分含量介于0~30%之间,水 动力条件很强,也是典型的河流相沉积。中期 (453.83~524.45 m)山间湖盆外流,平原区湖盆先 断陷后加速淤积,沉积了一套紫红色、棕红色、浅褐 色、紫褐色、棕褐色粘土、亚粘土、亚砂土地层。局 部钙质胶结,土层硬脆,刀劈后呈碎块状。夹多层 古土壤,以浅湖洼地相沉积为主。代表性样品 409 号样(431.70 m) 概率累积曲线呈细一段型(图 5a),粒径区间 2.5~9.5 Φ,总体曲线斜角约 40°左右。 频率曲线呈双峰态,标准偏差1.5 左右,偏度-0.3 左 右。反映了水动力条件减缓,细砂、极细砂组分含 量很低,为湖泊相向浅湖洼地相转变。上新世晚期 (321.72~453.83 m), 沉积物主要为红棕色、棕红 色、棕褐色、棕红(显紫)色、紫红色、浅棕黄色粘土、 亚粘土、亚砂土,少夹灰黄色、黄灰色中细砂、中粗 砂、粗砂层。砂中局部钙质胶结,坚硬似岩;土中局 部含较多的铁锰质小核,夹古土壤层,以河流相与 湖相交互沉积为主。全区构造作用导致中部坳陷 区沉降速率远大于山前坳陷,隆起区更是普遍较 小,HS1 钻孔位于坳陷区沉降中心地带,总地层沉 积厚度较大,为278.28 m,未见底。

进入早更新世(111.70~321.72 m),早期同样 为湖相沉积间有河流相沉积的模式。但由于构造 运动继续加剧,原先发育的大(265 号样,258.80 m, 图 5-b)小河流(301 号样,295.10 m,图 5-d)与浅湖 洼地(213 号样,198.51 m,图 5-a)不断汇集。同时, 概率累积曲线二段型(252 号样,233.37 m,图 5-c) 和三段型(236 号样,216.59 m,图 5-e)代表的泛滥 平原沉积环境占比均有所增加,表明水动力条件发 生变化的频率增加。同时出现代表复杂地质营力 环境的多段型概率累积曲线(186 号样,181.44 m, 图 5-f),说明该时期沉积不仅受构造作用控制,而 且可能受气候等其他因素影响。地层中出现的化 石组合由 Leucoythere - Ilyocypris - Candoniella 组合 (216~260 m)变为 Lishania-Ilyocypris 组合(169~189 m),分别代表温暖干燥气候的河湖-池沼-河流小 溪相和代表温凉气候的池沼-河流小溪相沉积环 境,也似乎印证了这一结论。早中期(167.40~ 321.72 m)沉积物为红棕色、棕黄色、浅褐灰色粘土、 亚粘土、钙核粘土和灰黄色中细砂、中粗砂组成的 正韵律,而后期(111.70~167.40 m)二者不等厚互 层,也说明在这一时期沉积中河流的主体地位不断 增加。该时期沉积的地层厚度为 210.02 m。

中更新世(39.61~111.70 m),河流在平原上不 断发展,沉积环境以河流相、片流相和短时洪泛相 为主。下岩相组合(69.20~111.70 m)上部为棕色、 灰黄色、棕黄色、红棕色粘土、亚粘土、亚砂土,局部 含钙质结核,见锈黄色斑点染,下部少夹灰黄色含 粘土粉细砂、中细砂及灰黑色淤泥质粘土薄层。淤 泥质粘土中局部(77~119 m)可见螺类化石碎片, 为 Candoniella-Ilyocypris 化石组合。概率累积曲线为 三段型(90 号样,89.30 m,图 5-e),说明同一地区可 能存在多条河流补给,为河流交汇的河间浅湖洼地 带,但整体存在时间较短。概率累积曲线二段型 (57 号样,59.00 m,图 5-c)跳跃组分约占 60%,悬 浮组分约占 40%,截点 1.6 Φ 左右,跳跃总体曲线斜 角约 50°。频率曲线呈单峰态,标准偏差 1.96,偏度 0.95,曲线缺失推移组分,悬浮组分含量较高,水动 力条件一般,说明以浅湖、洼地相沉积为主,局部为 沼泽相沉积。而晚期(39.61~69.20 m)沉积物由浅 棕黄(微红)色、棕色、黄灰色亚砂土、亚粘土构成, 下部夹棕黄色、灰黄色细砂、粉细砂薄层,局部含钙 质结核。概率累积曲线变为细一段型(48号样, 46.10 m,图 5-a),粒径区间 3.5~9.5 Φ,总体曲线斜 角约30°,反映水动力条件逐渐减缓,以洼地相、漫 滩相沉积夹河流相沉积为主。总而言之,中更新世 以来大面积的湖泊已经基本被河流填平消失,同时 河流的堆积作用也达到一定的峰值,沉积的总地层 厚度为 72.09 m。

晚更新世(8.75~39.61 m),河流相逐渐退出历 史舞台,开始向泛滥平原转变。早期(30.07~39.61 m)沉积了一套浅棕黄色、黄灰色夹亚砂土、粘土薄

层的正韵律砂层,代表概率累积曲线呈二段型(40 号样,37.00 m,图 5-c),跳跃组分约占 50%;悬浮组 分约占30%,截点2.6 Ф 左右,跳跃总体曲线斜角约 45°。中岩相组合(17.90~30.07 m)由灰黄色、棕黄 色亚砂土、亚粘土、粘土,夹灰黄色、黄灰色粉细砂、 细砂薄层构成;概率累积曲线为多段型(30号样, 23.30 m,图 5-f),以岸后洼地间河流相沉积为主。 晚期(8.75~17.90 m)地层沉积物粒径变细,由灰黄 色、黄灰色亚粘土、亚砂土,夹灰色、深灰色淤泥质 粘土组成,局部显水平层理,夹灰绿色粘土(14.94~ 15.09 m 间)薄层,代表概率累积曲线呈细一段型 (21号样,11.10 m,图 5-a),缺少细砂组分,发育 Ilyocypris-Candoniella 化石组合(5.00~24.50 m),以沼 泽、洼地相沉积为主。这一时期水动力条件不断减 弱,处于河流向泛滥平原转变的过渡期,均为短距 离的搬运沉积。晚更新世以来,HS1 钻孔所在无 极-衡水断裂以南河流途经断裂,整体转向 NE 向, 呈现出左旋错动,一定程度上丰富了物源,因此此 处沉积物堆积条件优于周边(李海君等,2017),总 地层厚度为 30.86 m。

进入全新世以后(0~8.75 m),泛滥平原、决口 扇发育。早期岩相组合(5.49~8.75 m)由浅灰棕 色、灰色、灰黑色淤泥质粘土,浅棕褐色亚粘土,棕 褐色、灰褐色粘土组成,显水平层理,见锈黄色斑点 染,夹灰绿色粘土条带。7.69 m 处见一厚壳蚌化石 大片,概率累积曲线为细一段型(16 号样,7.10 m, 图 5-a),以沼泽、洼地相沉积为主。上岩相组合 (0.00~5.49 m)由灰黄、灰褐色粉质亚砂土、亚粘土 组成(顶部具壤化),水平层理发育,为洪泛相沉积。 概率曲线呈三段型(8号样,3.60 m,图 5-e),跳跃 总体约占 77%, 悬浮总体约占 3%, 截点 8.2 Ф, 跳跃 总体曲线斜角约 30°,在粗端有一个截断点 (4.7Φ) 。总体分选性较差,含有 2 个众数值,分别 为 7 Φ 和 9.5 Φ .反映了泛滥平原相沉积环境。据 许炯心(2007)基于¹⁴C测年对华北平原的沉积速率 的研究,30 ka BP 以来,沉积速率先呈增加趋势,在 1.2 ka BP 处达到峰值,然后再减小。不同地质时期 的平均沉降速率(本时段地层厚度与本时段的时间 之比)快慢相间,且沉降幅度越来越小,全新世地层 沉积厚度最小,仅为8.75 m。

综上所述,自上新世晚期以来,华北平原地区 以冀中坳陷为代表的坳陷区长期处于以下降为主 的沉积状态,山区则以间歇性上升为主。平原区物 源供应充足,第四纪地层分布广泛,连续齐全,山区 及盆地则因沉积间断,存在地层的不连续性。其现 代地貌是在新近纪地貌的基础上,经过长期的地质 作用发展起来的,并表现出继承性、连续性和阶段 性。在第四纪古气候冷暖干湿的交替变化、复杂的 古地理环境及其他各种因素的影响下,形成由以河 流相为主的沉积相变为以冲积、冲洪积、洪泛相等 为主的多种沉积相。

4.2 沉积物粒度与古气候的耦合性分析

冀中坳陷位于北半球中纬度季风气候区,受南 北气候带及东西向海陆分布影响,气候变化敏感, 环境效应显著(巩晓燕等,2006)。根据范淑贤等 (2009)划分的 HS1 钻孔孢粉记录气候演化阶段和 毕志伟等(2012)利用碳、氧同位素定量重建的古温 度变化曲线(图 6),结合沉积物岩性,与 HS1 钻孔 沉积物的粒度组成特征进行对比性研究。

根据粒度分析的结果,上新世晚期以来,冀中 坳陷早期河流相、不稳定小型浅湖相发育,水动力 条件较强,在新构造运动影响下,不断发展,最终向 泛滥平原转变。期间整体水动力条件不断减弱,细 粒组分不断增加,间接指示了气候由湿润逐渐变为 干旱,与同时期的孢粉和碳、氧同位素记录具有一 致性。这与华北地区上新世晚期以来喜暖湿种属、 森林型动物不断减少,而耐干旱种属、草原型动物 逐渐增加的时间变化规律也相符合(邱亚会等, 2018)。由于碳、氧同位素样品主要采集于粘土、亚 粘土层位,粉细砂、砂层均未采样,故仅将利用其定 量重建的古温度曲线与粘土含量变化曲线进行对 比。显而易见,在末次冰期(73~11.5 ka BP)、倒数 第二冰期 MIS6~10(316~154 ka BP) 和倒数第三冰 期 MIS12~16(710~460 ka BP)(易朝路等,2005), 沉积物的粘土组分含量与碳、氧同位素定量重建的 古温度曲线变化的趋势大致相同,均存在明显的阶 段性变化,恰好对应不同的小冰期阶段。与此同 时,在倒数第二冰期 MIS6~10(316~154 ka BP), 碳、氧同位素与孢粉共同记录的更寒冷干旱的气候 条件下,沉积物粘土组分含量明显高于气候条件更 温暖干燥的末次冰期(73~11.5 ka BP)。而在孢粉 带所记录的温暖湿润气候条件下,沉积物的粗颗粒 组分明显增多;介于二者之间的气候条件下,沉积 物的粒径变化较平缓,粒径区间范围较宽。整体



图 6 HS1 钻孔综合对比 Fig. 6 HS1 borehole comprehensive comparison

看,冀中地区气候变化不稳定,上新世以来经历了 多期冷暖干湿变化,早中更新世开始有人类活动, 而小冰期以来的气候变化则与人类活动关系更密 切(范保硕等,2019;李柔珂等,2020)。HS1 钻孔沉 积物粒度曲线反映的沉积环境的旋回性变化与孢 粉记录划分的气候冷暖演化阶段具有同趋性,粒度 特征记录的区域气候干湿变化与华北地区其他钻 孔同时期的记录(李玉嵩等,2011;吕国军等,2017; 胡云壮等,2020)也显示出较好的一致性,这对恢复 区域古气候古环境变化具有重要意义。

4.3 以气候变化为主导的多因素沉积响应模式

早在新近纪之前的盆地热裂陷阶段,冀中坳陷 发育形成了宝坻--桐柏镇、徐水-文安及衡水-无极 三大一级构造变换带(孔冬艳等,2005)(图1),其 两侧具有不同的构造样式及沉积特征,且分布新生 代不同时期的岩浆岩。据张培震等(2002)研究,冀

中坳陷新近纪进入盆地热沉降阶段,早期构造活动 较弱。新近纪,在湖相沉积基础上,中新世沉积了 一套岩性以灰色砂岩与紫红色、灰绿色泥岩互层为 主的地层,上新世沉积物岩性则逐渐开始向棕红、 黄色砂岩夹泥岩转变(杨旭升等,2004)。这一阶段 地层岩性整体表现为细颗粒沉积物减少,粗颗粒沉 积物增加,反映了气候由湿润向干旱变化的过程, 与沉积物颜色指示的由还原环境向氧化环境变化 具有同趋性。第四纪,冀中坳陷继承了新构造运动 特点,据李海君等(2017)研究,研究区沉降具东西 分带、构造相关及南北分块特性: 坳陷区构造沉降 速率高于隆起区,介于 0.032~0.200 mm/a 之间;而 全新统沉降速率加快,且隆、坳构造间差异继续缩 小,沧县隆起与无极衡水断裂控制了背景沉降形态 (表3)。这说明,新构造运动对沉积物的空间分布 具有控制作用。卢海峰等(2014)对位于不同构造

表 3 华北平原各时期平均沉降速率(据李海君等,2017)

2023年

	Table 3	Average sedimentation rates of tectonic units in North China Plain						
								mm∕ a
地质时代	太行山前 保定 SW	冀中坳陷 饶阳 SWW	沧县隆起 阜城 NE	沧东断裂 沧州 SE	黄骅坳陷 黄骅 SSW	埕宁隆起 海兴 SE	临邑坳陷 阳信 SSE	HS1 钻孔
晚更新世	0.142	0.286	0.146	0.245	0.287	0.152	0.155	0.271
中更新晚期	0.135	0.234	0.174	0.202	0.233	0.126	0.095	0.276
中更新早期	0.115	0.201	0.099	0.172	0.207	0.102	0.095	0.363
早更新晚期	0.097	0.228	0.086	0.142	0.166	0.036	0.032	0.062
早更新早期	0.121	0.156	0.122	0.099	0.092	0.059	0.032	0.171

分区的 ZK1 和 ZK2 钻孔的地层对比也印证了这一 结论。根据钻孔岩相古地理演化特征分析,计算出 HS1 钻孔各时期的平均沉积速率,再与冀中坳陷饶 阳(SWW 向)对应数据进行对比发现,早更新世以 来二者之间变化的趋势差异较大,说明时间尺度上 新构造运动与沉积物粒度特征的相关性不明显。 而地形地貌受构造运动控制,对沉积物粒度小范围 的空间分布也具有重要响应。据李海君等(2017) 的研究,华北平原自西部山前到东部平原的沉降区 第四系厚度逐渐增大,并存在若干个沉积中心。据 朱宣清(1984)、黄惠玉(1992)及赵红梅等(2014)对 滹沱河道沉积物的研究,纵向上,从上河段至下河 段,随着搬运距离的增加,水动力由强到弱,粒度由 粗到细:横向上,各河段从主河道--心滩--边滩--天然 堤随着沉积高度的增加,水动力由强到弱,沉积物 粒度由粗到细;而时间序列上,自上新世以来,HS1 钻孔水动力条件减弱,沉积物粒度细粒组分不断增 加。根据对河北省80多个水文钻孔的重矿物资料 分析(倪明云等,1985),区域内物质来源大致相同, 以河流搬运为主,携带局部原地风化岩屑,对沉积 物中的矿物组合具有一定的影响,与粒度组分没有 较直接的关系。

总之,气候变化是冀中坳陷沉积物粒度变化的 主要控制因素,而新构造运动、地形、物源等因素对 沉积物粒度小范围内的空间分布具有一定的影响。

5 结 论

综合沉积物的颜色、岩性、结构、构造、岩相组 构、沉积旋回、接触关系特征,及其形成时代、生物 标志,结合HS1钻孔所记录的粒度参数、曲线特征, 将衡水钻孔剖面由上而下划分为5个大的沉积阶段 和16个次沉积组段,并系统研究了其沉积学特征。

(1)HS1 钻孔记录了自上新世晚期(3.50 Ma BP)以来,以冀中坳陷为代表的华北平原坳陷地区 在新构造运动长期震荡式下降和气候不断变化的 条件下,经以流水作用为主的各种内、外动力综合 改造下区域沉降的过程,依次经历了河流相与不稳 定浅湖洼地相交替(上新世晚期)、河流相(早更新 世)、河流相-片流相-短时洪泛相(中更新世)、河流 相和泛滥平原相交替(晚更新世)、泛滥平原相(全 新世)5个沉积演化阶段。

(2)HS1 钻孔自下而上沉积物所处的水动力条 件不断减弱,细颗粒组分不断增加。沉积物粒度颗 粒组分含量与碳、氧同位素和孢粉记录的气候变化 具有同趋性,具体表现为在寒冷干旱气候条件下细 颗粒组分含量增加,温暖湿润的气候条件下粒度粗 颗粒组分含量增加,介于二者之间的气候条件下, 沉积物的粒径变化较平缓,粒径区间范围较宽。总 之,气候变化对冀中坳陷沉积物粒度起主要控制作 用,且粒度曲线反映的沉积环境的旋回性变化与孢 粉记录划分的气候冷暖演化阶段耦合性较好。

(3)气候变化是冀中坳陷沉积物粒度变化的主 要控制因素,而新构造运动、地形、物源等因素对沉 积物粒度小范围内的空间分布具有一定的影响。

参考文献

- Blaauw M. Methods and code for " classical " age modeling of radiocarbonsequences [J]. Quaternary Geochronology, 2010, 5 (5): 512-518.
- Wu C, Qian P, Zhen X M, et al. Quartz grain characteristics of the late Pleistocene hard clay in the Yangtze River delta and implications for sedimentary environment and provenance [J]. Quaternary Research, 2020,97:199-215.

- 毕志伟,杨振京,赵华,等.华北平原中部晚上新世以来沉积物碳氧同 位素特征及其古环境意义[J].地理与地理信息科学,2012,28(3): 93-95.
- 陈望和, 倪明云. 河北第四纪地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1102115.
- 丁国瑜,高維明,黄述銀,等.华北平原第四纪沉积物的颜色特征及其 地质意义[J].地质科学,1964,(2):143-159.
- 范保硕,张文胜,张茹春,等.华北平原小冰期以来干湿变化与人类活动特征[J].第四纪研究,2019,39(2):483-496.
- 范淑贤,刘海坤,徐建明,等.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,2009,23(1):75-81.
- 巩晓燕,魏明建,张玉华.华北地区全新世气候时空变化特征研究述 评[J].首都师范大学学报(自然科学版),2006,27(4):73-78.
- 胡云壮,杨吉龙,李影,等.3 Ma 以来华北地区植被演化特征及其驱动 因素[J].地质学报,2020,94(10):3120-3129.
- 黄惠玉.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),1992,(4):467-473.
- 纪友亮,赵贤正,单敬福,等.冀中坳陷古近系沉积层序特征及其沉积 体系的演化[J].沉积学报,2009,27(1):48-56.
- 孔冬艳,沈华,刘景彦,等.冀中坳陷束鹿凹陷横向调节带成因分析[J]. 中国地质,2005,32(4):690-695.
- 李海君,张耀文,谷洪彪.华北平原地面沉降新构造运动影响[J].南水 北调与水利科技,2017,15(A02):128-134,140.
- 李华梅,王俊达,安芷生.河北衡水地区钻孔岩心的古地磁研究[J].地 球化学,1977,(3):210-218.
- 李理, 王晶. 冀中坳陷衡水-无极构造变换带的特征及其成因机制[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(1): 69−76.
- 李柔珂,韩振宇,徐影,等.高分辨率区域气候变化降尺度数据对京津 冀地区高温 GDP 和人口暴露度的集合预估[J].气候变化研究进 展,2020,16(4):491-504.
- 李艳红,徐莉,陈成贺日,等.新疆罗布泊湖盆沉积物剖面粒度与磁学 特征及沉积环境[J].地质通报,2014,33(10):1507-1513.
- 李玉帮,张以明,杨德相,等.冀中坳陷奥陶纪岩相古地理[J].古地理学报,2021,23(2):359-374.
- 李玉嵩,陈建强,赵硕,等.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,2011,32(2):178-188.
- 梁富康,刘丽萍,于兴河,等.冀中坳陷深县凹陷主伸展期的构造调节 带及其对沉积环境的控制作用[]].地质科学,2013,48(1):254-262.
- 刘海金,龚志军,罗明,等.沉积物含水量及误差变化对光释光测年精 度的影响研究[J].第四纪研究,2021,41(1):123-135.
- 卢海峰,王金艳,王瑞.河北省衡水地区第四纪中—晚期标准地层剖面的建立及其地质含义[J].现代地质,2014,28(5):962-970.
- 卢连战,史正涛.沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J].环境科 学与管理,2010,35(6):54-60.

- 吕国军,刘志辉,张合,等.邢台紫山西断裂控制性钻孔第四纪孢粉组 合及其古气候环境演变[J].华北地震科学,2017,35(1):56-61.
- 倪明云,陈望和.河北平原第四纪重矿物的分布规律[J].中国科学(B 辑),1985,12:1139-1148.
- 牛宏,梁杏,李静,马斌,等.衡水地区咸水层沉积物粒度及氘氧同位素 的古气候指示[J].地球科学,2016,41(3):499-507.
- 钱永,张兆吉,费宇红,等.华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J].中国生态农业学报,2014,(8):890-897.
- 邱亚会,李永项,敖红,等.华北早更新世哺乳动物群的磁性地层年代 序列与古环境关系:兼论对古人类活动的指示意义[J].第四纪研 究,2018,38(5):1268-1292.
- 邵时雄,安仲元,韩书华.河北平原新构造运动主要特征的分析[J].海 洋地质与第四纪地质,1984,(4):67-77.
- 沈华,范炳达,王权,等.冀中坳陷油气勘探历程与启示[J].新疆石油地 质,2021,42(3):319-327.
- 王旭龙,卢演俦,李晓妮:细颗粒石英光释光测年:简单多片再生法[J]. 地震地质,2005,27(4):615-623.
- 吴忱.华北地貌环境及其形成演化[M].北京:科学出版社,2008:1-101.
- 熊毅,席承藩.华北平原第四纪沉积物的性质及其演变[J].科学通报, 1957,2(6):173-173.
- 许洪才.浅谈华北平原北部第四系沉积物的成因机制[J].河北地质, 2018,(1):15-19.
- 许炯心.基于大样本 14C 测年资料的华北平原沉积速率研究[J].第四 纪研究,2007,27(3):437-443.
- 许清海.华北平原不同地貌单元冲积物孢粉组合特征[J].科学通报, 1994,39(19):1792-1792.
- 杨旭升,刘池阳,杨斌谊,等.冀中坳陷衡水转换断裂带特征及演化[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(3):5-8.
- 易朝路,崔之久,熊黑钢.中国第四纪冰期数值年表初步划分[J].第四 纪研究,2005,25(5):609-619.
- 张静,徐建明,刘海坤,等.华北平原晚更新世以来岩石地层、生物地层 及气候地层[J].现代地质,2009,23(1):64-74.
- 张亮,刘文涛,贾磊,等.海南三亚海域沉积物分布特征及其沉积环境 指示[J].地质通报,2021,40(2):341-349.
- 张培震,王琪,马宗晋.中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动 地块[J].地学前缘,2002,9(2):430-441.
- 张文朝,崔周旗,韩春元,等.冀中坳陷老第三纪湖盆演化与油气[J].古 地理学报,2001,3(1):45-54.
- 赵红梅,刘林敬,赵华,等.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,2019,43(4):389-400.
- 赵红梅,赵华,毛洪亮,等.华北平原滹沱河冲洪积扇第四纪地层划分[J].地 层学杂志,2014,38(2):137-146.
- 朱宣清,何乃华.滹沱河现代沉积物的比重研究[J].沉积学报,1984, (3):118-123.