

山东沂河中游段古河道形态特征与古流量

曹光杰, 于磊, 张学勤

临沂大学资源环境学院, 山东临沂 276005

摘要: 选择沂河中游段作为研究河段。根据芭山橡胶坝、北社橡胶坝、沂水县南王庄沂河大桥、336省道(S336)沂河大桥、沂南县澳柯玛沂河大桥的钻孔资料, 绘制了5个断面沂河古河槽地质剖面图。在洙阳村附近沂河断面进行了电测法物探, 根据钻探验证结果对物探测量的沉积层厚度进行了校正, 绘制了洙阳村附近沂河断面古河槽地质剖面图。在洙阳村附近沂河两岸, 澳柯玛沂河大桥附近沂河西岸, 挖掘剖面采集了光释光(OSL)年代样品, 在中国科学院青海盐湖研究所、南京师范大学光释光实验室进行了测试, 获得了15个年代结果。选择澳柯玛沂河大桥附近剖面, 用河相关系法计算了末次冰期最盛期(LGM)、晚冰期(约12 000 aB.P.)和全新世中期(约7 000 aB.P.)的古流量。结论认为, 沂河现在河床下方的基岩河槽为末次冰期最盛期的古河槽, 古河道纵比降较大; 古河槽宽深比大, 河槽宽浅, 属于砾石河床分汊型; 澳柯玛沂河大桥断面, 末次冰期最盛期、晚冰期、全新世中期古流量分别约为 $17\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词: 沂河; 古河道; 古流量; 末次冰期最盛期; 晚冰期; 全新世中期

中图分类号: P343.1; P332.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.080802

Morphological Characteristics of the Paleo-channel and Paleo-discharge in the Middle Reaches of the Yihe River in Shandong Province

CAO Guang-jie, YU Lei, ZHANG Xue-qin

School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005

Abstract: With the middle reaches of the Yihe River as the study area, the authors drew stratigraphical cross sections of paleochannels based on the drilling data in five places which included the Bashan rubber dam, the Beishe rubber dam, the Nanwangzhuang Yihe Bridge, the S336 Yihe Bridge, and the Aucma Yihe Bridge. The authors applied electrical sounding method to the cross section of Yihe River near Zhuyang Village, and derived the depth of sediments which was further calibrated by the drilling records. Based on the corrected results of sediment depth, the authors drew the stratigraphical cross section of the ancient river channel at this place. Also, the authors dated 15 samples collected at the Yihe River banks near Zhuyang Village and the Aucma Bridge at the OSL laboratories in the Qinghai Institute of Salt Lakes of Chinese Academy of Sciences and Nanjing Normal University. Finally, the authors analyzed the configuration of the cross section at the Aucma Yihe River Bridge, and calculated river discharge at the Last Glacial Maximum (LGM), the Late Glacial Epoch (12 000 aB.P.), and the Mid-Holocene (7 000 aB.P.) using the discharge-sediment relation. It is concluded that the bedrock below the current river bed was the paleo-channel at the LGM whose stream gradient was higher. The ancient river took a braided form, which was characterized by a larger breadth-depth ratio, and wide and shallow river channels. At the cross section near the Aucma Yihe Bridge, the discharge at the LGM, the Late Glacial Epoch, and the Mid-Holocene were approximately $17\text{ m}^3/\text{s}$, $20\text{ m}^3/\text{s}$, and $30\text{ m}^3/\text{s}$, respectively.

Key words: Yihe River; paleo-channel; paleo-discharge; Last Glacial Maximum; Late Glacial Epoch; Mid-Holocene

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41372182)和山东省自然科学基金项目(编号: 6011701512)联合资助。

收稿日期: 2018-06-06; 改回日期: 2018-07-20; 网络首发日期: 2018-08-10。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 曹光杰, 男, 1964年生。教授, 博士。主要从事晚第四纪地球环境演变研究。通讯地址: 276005, 山东省临沂市兰山区双岭路中段临沂大学资源环境学院。E-mail: guangjiecao@163.com。

水循环是联系地球系统大气圈、岩石圈、生物圈的纽带,过去水循环的特征及其在环境变化中的作用,是全球变化研究的核心内容之一,对于预测未来环境变化具有重要意义(Starkel, 1993; Baker et al., 1993)。研究河流是研究地表水循环最核心、最关键的环节与内容,要恢复末次冰期的地表环境,没有对于当时河流状况的了解是不全面的,因此末次冰期的河道演变及沉积问题,一直是国内外研究的热点领域。Fisk and Mcfarland(1955)、Fisk(1961)、Coleman and Gaglino(1964)以大量钻孔资料对密西西比河河口晚第四纪沉积和地层作了详细的研究,区分出下切河谷和古河间地。Henk et al.(2000)依托大量钻孔资料研究了欧洲莱茵河河道与沉积体系, Oomkens(1974)也在大量钻孔基础上划分了尼罗河三角洲沉积体系。Green(2009)通过高分辨率的物探分析,对南非东海岸下切古河槽的形态与位置进行了恢复。

我国自 20 世纪 60 年代以来,结合钻探、物探及年代学、生物学等手段,形成了大量的古河道研究成果。如对长江下游古河道研究(杨达源, 1986; 杨怀仁等, 1995; 李从先和汪品先, 1998, 李从先和张桂甲, 1995, 2002; 曹光杰等, 2009, 2015; Cao et al., 2016; Zhang et al., 2018), 对黄河及华北平原古河道的研究(吴忱等, 1986, 1991; 张祖陆, 1990; Wu et al., 1996), 对珠江(赵焕庭, 1982; 黄镇国等, 1995)、钱塘江(Lin et al., 2003; Zhang et al., 2014)、淮河(傅先兰和李容全, 1998)、嫩江(马建平, 1994)古河道的研究,以及对陆架浅海古河道的研究(刘振夏等, 2000; 夏东兴和刘振夏, 2001; 李广雪等, 2005; 刘奎等, 2009)等。另外,谢悦波等(2001)、王恒松等(2012)还对长江、黄河等古洪水进行了研究。

从埋藏古河道研究的区域看,主要集中在东部平原地区的大江大河上,对非直接入海的区域性河流研究很少。

沂河发源于山东省沂源县鲁山南麓,全长 574 km,流域面积 17 325 km²,在山东省境内长约 280 km,流域面积约 9 383 km²。进行沂河古河道及古流量的研究,将为探讨末次冰期以来华北季风区的古水文与古环境提供重要的线索。目前对沂河古河道的研究成果很少(Shen et al., 2015; 曹光杰等, 2017),还没有对沂河古流量的研究,本文拟对沂河中游段的古河道与古流量进行研究。沂河中游是从山区流入平原的过渡段,主要支流东汶河、蒙河在该段汇入,具有一定的典型性。通过对芭山橡胶坝断面、北社橡胶坝断面、南王庄沂河大桥断面、S336 沂河大桥断面、澳柯玛沂河大桥断面及洙阳村附近断面(图 1)的分析,探讨沂河古河道的形态特征。选择澳柯玛沂河大桥断面,计算沂河末次冰期最盛期、晚冰期、全新世中期的古流量。

1 资料与研究方法

1.1 资料的搜集及河槽剖面图的绘制

搜集了 5 个横跨沂河断面的工程地质钻孔: 芭山橡胶坝剖面 11 个、北社橡胶坝剖面 9 个、南王庄沂河大桥剖面 23 个、S336 沂河大桥剖面 14 个、澳柯玛沂河大桥断面 17 个。钻孔资料包括位置、深度、各沉积层的厚度及特征等。

根据钻孔间的距离及钻孔深度,分别确定横比例尺、纵比例尺。用 Mapinfo 软件,绘制各断面的沂河古河槽地质剖面示意图。

搜集了葛沟水文站 1954—2007 年的水文资料。

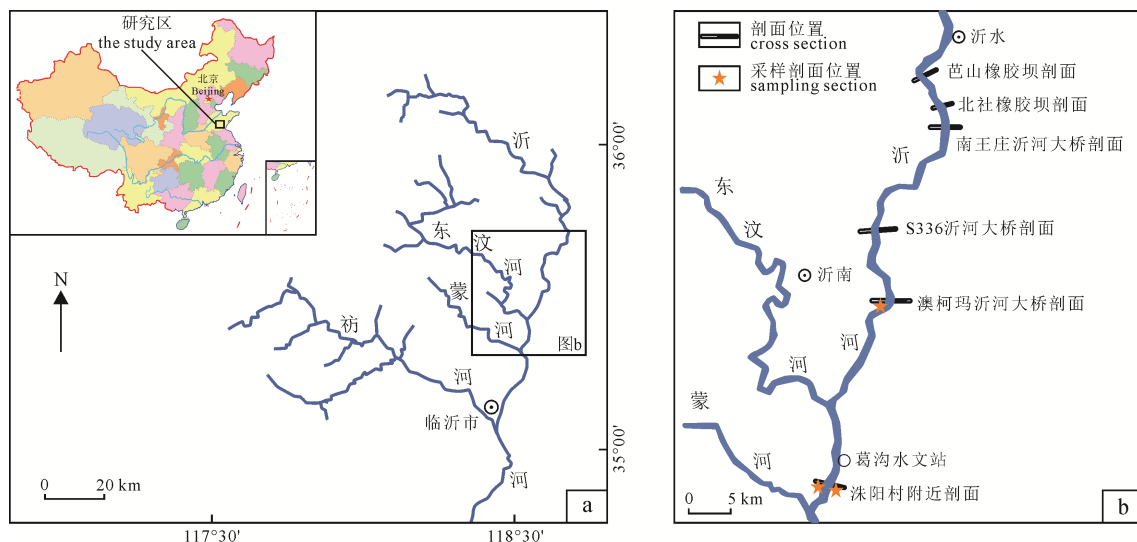


图 1 沂河中游段各剖面位置示意图

Fig. 1 Location of each section in the middle reaches of the Yihe River

1.2 电测法物探测量

在洙阳村附近沂河河床近东西方向上, 采用视电阻率对称四极测深法进行物探测量。从西向东完成视电阻率测深点 37 个, 点距 25 m, 测线长度 900 m。根据视电阻率等值线, 推算得出 37 个测点第四纪沉积层的厚度。经钻探验证, 物探得出的各沉积层厚度比实际厚度平均偏大约 14.09%(曹光杰等, 2017)。测探工作由山东省第七地质矿产勘察院完成。

1.3 样品采集及分析测试

在沂南县澳柯玛沂河大桥西岸(剖面 1)及洙阳村段沂河东岸(剖面 2)、中部(剖面 3)、西岸(剖面 4)挖掘了 4 个剖面, 采集光释光(OSL)年代样品。在剖面 1 采集 OSL 年代样品 3 个, 剖面 2 采集 OSL 年代样品 5 个, 剖面 3 采集 OSL 年代样品 4 个, 剖面 4 采集 OSL 年代样品 3 个。采集的样品分别送中国科学院青海盐湖研究所、南京师范大学光释光实验室等进行了测试, 得到了 15 个年代结果。主要样品的采样信息及测试结果见表 1。

2 剖面分析

2.1 芭山橡胶坝附近剖面

图 2 是根据芭山橡胶坝工程地质钻孔资料绘制

的古河槽地质剖面示意图。该段沉积物的厚度大部分在 9~12 m, 河床左侧沉积物较厚, 右侧沉积物较薄, 下伏寒武系灰岩。上层沉积物为黄褐色中粗砂, 松散—稍微密实, 含少量砾石, 砾石粒径 1~3 cm; 下层为黄褐色砾质粗砂, 中等密实, 饱和, 含较多砾石, 砾石粒径 3~8 cm。埋藏基岩河槽位于现在河床的下方, ZK3、ZK4 孔之间有相对较高的埋藏基岩, 最高处高程约为 118 m, 河槽最深到达基岩的高程约为 112.91 m。

2.2 北社橡胶坝附近剖面

图 3 是根据北社橡胶坝工程地质钻孔资料绘制的古河槽地质剖面示意图。该段沉积物的厚度大部分在 6~8 m, 河床左侧较厚, 右侧较薄, 下伏寒武系灰岩。上层为细沙层, 松散, 厚 1.00~1.50 m, 主要分布于现在河漫滩; 中层为中粗砂层, 松散-稍微密实, 含较多砾石, 砾石粒径 1~3 cm, 主要分布于河床及河漫滩下部, 层厚 1.30~2.70 m, 层底高程 117.10~122.93 m; 下层为砾质粗砂层, 稍微密实, 砂质较纯, 层厚 1.10~6.30 m, 层底高程 114.20~120.33 m。砾石主要成分为石英、长石, 粒径 0.5~5.0 cm, 含量 15%~20%, 磨圆度一般。ZK1 孔下方为埋藏的基岩阶地, 高程为 120.33 m, 河槽最深到达基岩的高程为 114.20 m。

表 1 主要 OSL 年代样品采样信息及测试结果
Table 1 The sampling information and test results on main OSL samples

采样剖面	地面高程/m	埋深/m	测年材料	测试结果/aB.P.	测试单位
剖面 1	97.8	2.49~2.55	石英	4 030±230	中国科学院青海盐湖研究所
剖面 1	97.8	2.28~2.34	石英	3 820±220	中国科学院青海盐湖研究所
剖面 2	92.0	8.27~8.33	石英	11 017±442	中国科学院青海盐湖研究所
剖面 2	92.0	6.92~6.98	石英	11 000±900	南京师范大学
剖面 2	92.0	6.48~6.54	石英	10 269±509	中国科学院青海盐湖研究所
剖面 3	90.0	7.50~7.56	石英	8 300±700	南京师范大学
剖面 4	87.1	4.18~4.24	石英	13 000±1 100	南京师范大学
剖面 4	87.1	2.77~2.83	石英	7 500±700	南京师范大学

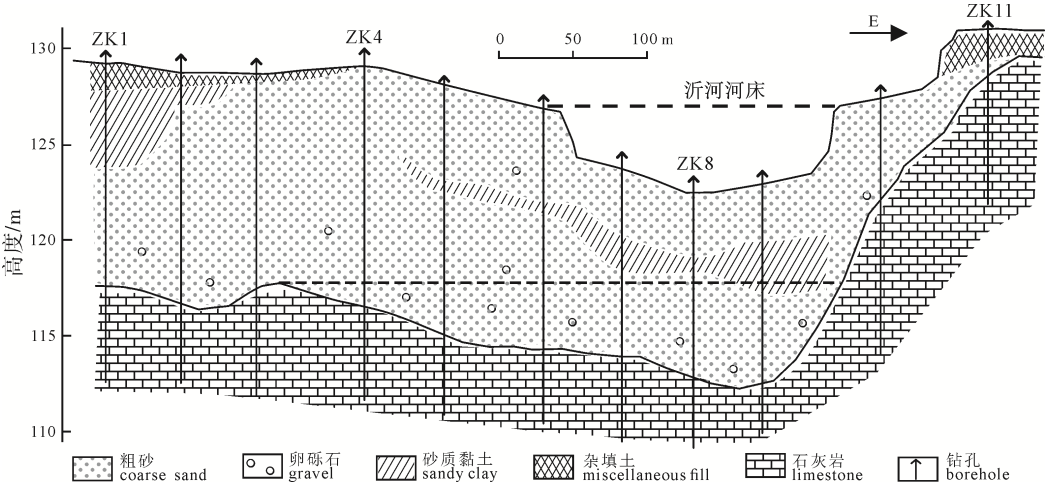


图 2 芭山橡胶坝附近沂河古河槽地质剖面示意图
Fig. 2 The stratigraphic cross section of the Yihe River paleo-valley near Bashan Rubber Dam

2.3 南王庄大桥附近剖面

图4是根据南王庄沂河大桥工程地质钻孔资料绘制的沂河古河槽地质剖面示意图。该段沉积物的厚度大部分在8~16 m, 河床左侧较厚, 右侧较薄。上层为中粗砂, 含少量砾石和卵石, 分选中等, 磨圆较差, 松散-稍微密实, 厚3.00~6.20 m, 层底标高114.34~120.67 m; 中层为含砾粗砂, 砾石含量约15%~30%, 分选及磨圆较好, 中等密实-密实, 层厚1.50~5.10 m, 层底标高110.67~117.31 m; 下层为卵砾石砂, 含少量黏土成分, 砂质级配较好, 卵砾石约占30%~40%, 密实, 层厚0.50~8.50 m, 层底标高107.37~111.39 m。在ZK1—ZK4孔之间约115~116 m、ZK20—ZK23孔之间约109~113 m有含泥粗砂层, 黏土成分含量约15%~30%。下伏基岩为砂质泥岩, 略有起伏, ZK5孔、ZK10孔处为基岩埋藏阶地, 基岩高程分别为110.17 m、111.8 m, 两孔之间为埋藏基岩河槽, ZK9孔到达基岩的高程为107.80 m。

2.4 S336 沂河大桥附近剖面

图5是根据S336沂河大桥工程地质钻孔资料绘制的沂河古河槽地质剖面示意图。该段沉积物的厚度大部分在10~16 m, 现在河床处稍薄, 10~12 m, 河床两侧较厚, 14~16 m。上层为粉质黏土, 厚

3~6 m, 硬塑-软塑状, 土质均匀, 在ZK10—ZK12孔之间有厚约0.7~0.9 m的素填土; 中层为中砂、粗砂、粗砾砂, 稍微密实-中等密实, 分选性较好, 含少量卵石, 磨圆度一般, 局部层位含少量粉质黏土; 下层为砾砂、粗砾砂, 含卵石, 磨圆度较好。河床下伏基岩为风化泥岩, 略有起伏。ZK3孔处为基岩埋藏阶地, 基岩高程为96.60 m, ZK6孔处基岩高程为96.40 m。ZK11孔到达基岩的高程是93.10 m。

2.5 澳柯玛大道沂河大桥附近剖面

图6是根据澳柯玛沂河大桥工程地质钻孔资料绘制的沂河古河槽地质剖面示意图。该段沉积物的厚度大部分在9~11 m。上层中粗砂, 厚2.4~4.4 m, 黄褐色, 饱和, 松散, 分选性较好, 含个别卵砾石, 磨圆较好; 中层为砾砂, 厚2.3~5.6 m, 黄褐色, 饱和, 稍微密实, 分选性一般, 含少量卵石、圆砾石, 磨圆度一般; 底层是卵砾石, 厚1.6~4.3 m, 褐色, 饱和, 中等密实, 分选性差, 磨圆度一般, 充填黏性土及中粗砂。在底部1.0 m左右为较大较纯的石英砂岩卵石, 最大粒径大于100 mm。卵砾石主要成分为石英、长石。下伏砂岩及安山角砾岩, 略有起伏, ZK15孔处为基岩埋藏阶地, 基岩高程为84.95 m, ZK6孔处基岩高程为82.80 m, ZK9孔到达

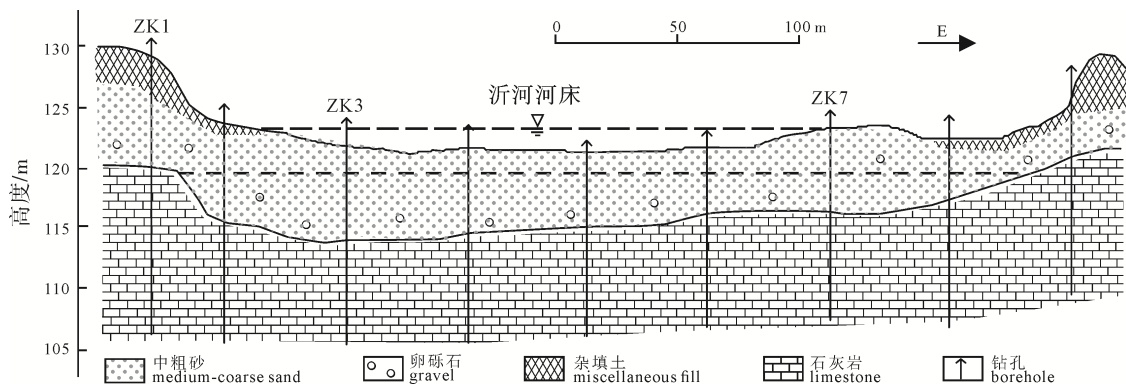


图3 北社橡胶坝附近沂河古河槽地质剖面示意图

Fig. 3 The stratigraphic cross section of the Yihe River paleo-valley near Beishe Rubber Dam

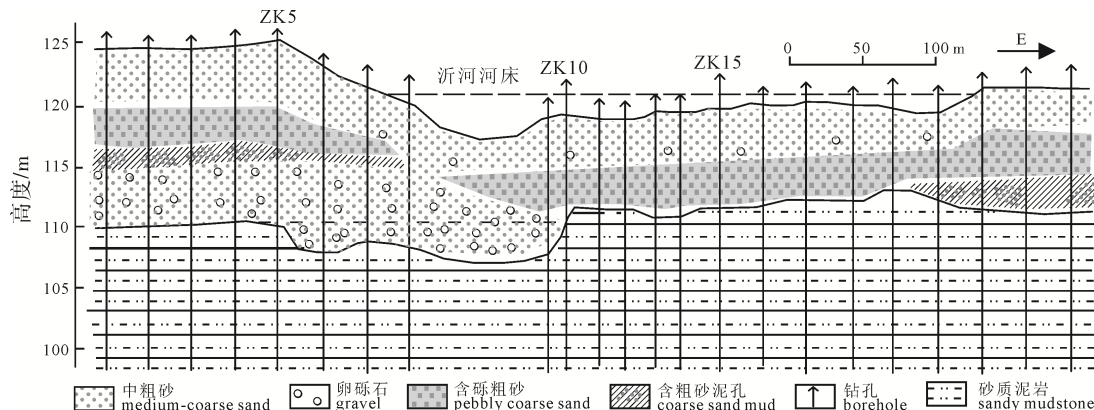


图4 沂水南王庄沂河大桥附近沂河古河槽地质剖面示意图

Fig. 4 The stratigraphic cross section of the Yihe River paleo-valley near the Nanwangzhuang Yihe River Bridge

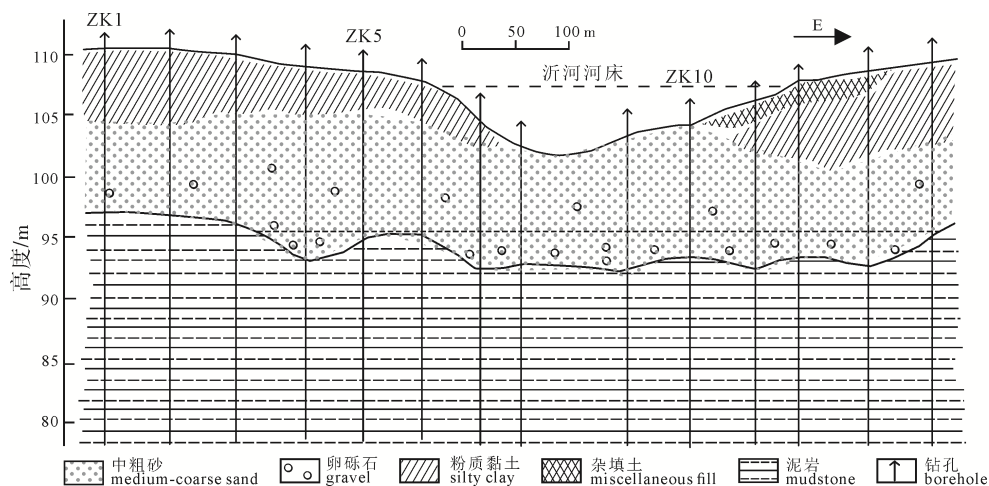


图 5 S336 沂河大桥附近沂河古河槽地质剖面示意图

Fig. 5 The stratigraphical cross section of the Yihe River paleo-valley near the S336 Yihe River Bridge

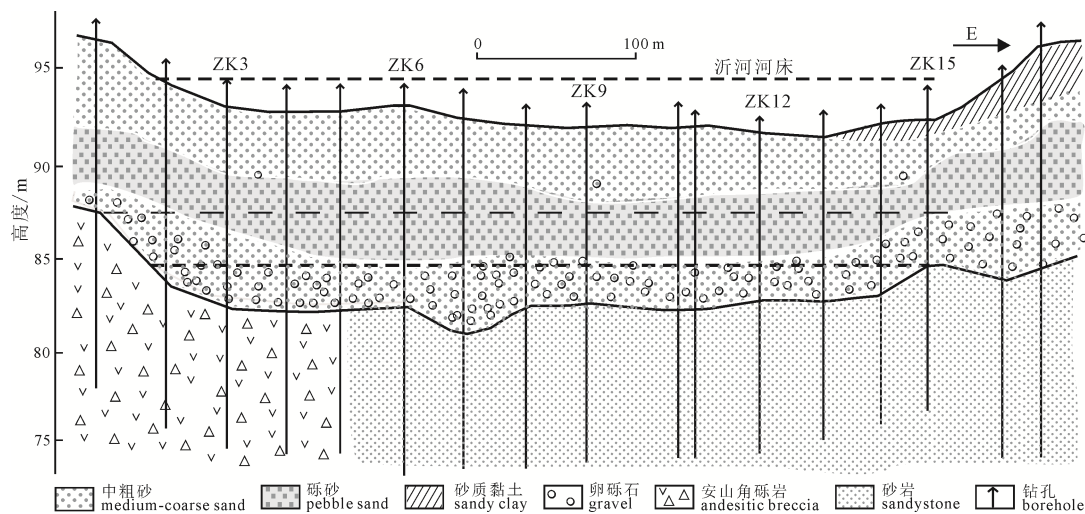


图 6 澳柯玛沂河大桥附近沂河古河槽地质剖面示意图

Fig. 6 The stratigraphical cross section of the Yihe River paleo-valley near the Aucma Yihe River Bridge

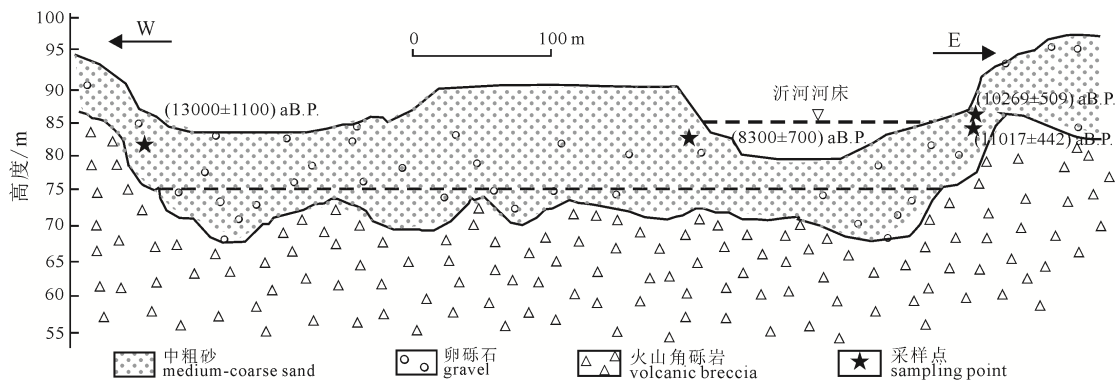


图 7 洙阳村附近沂河古河槽地质剖面示意图

Fig. 7 The stratigraphic cross section of the Yihe River paleo-valley near Zhuyang Village

基岩的高程为 82.75 m, ZK7 孔到达基岩的深度最深, 高程是 81.83 m。

2.6 洙阳村附近断面

洙阳村附近断面, 物探得出的 37 个测点的第四纪沉积物厚度, 根据 14.09% 的误差率进行校正, 得出各测点到达基岩的埋藏深度, 根据校正结果绘制了洙阳村断面沂河古河槽地质剖面示意图(图 7)。

该段沂河沉积物的厚度约 10~16 m, 右侧现在河床下方沉积物较薄, 河床左侧由于挖沙也较薄, 中部沉积物较厚。上层为黄褐色粗砂, 含少量卵石, 分选性一般, 磨圆度一般; 下层为粗砂砾石层, 分选性一般, 磨圆度一般, 底部含有较多的卵石, 主要成分为石英、长石。下伏火山角砾岩, 基岩有起伏, 埋藏基岩最深处的高程为 68.1 m。

3 讨论

3.1 古河槽宽深比

在洙阳村断面沂河东岸剖面, 高程 83.70 m、85.48 m 处中粗砂层样品的 OSL 测年结果分别为 $(11\ 017 \pm 442)$ aB.P.、 $(10\ 269 \pm 509)$ aB.P.(表 1 剖面 2), 计算得出两个样品点之间的平均沉积速率为 238 cm/ka, 按此沉积速率推算, 在高程约 75.3 m 处沉积物的年代约为 15 000 aB.P.。在西岸剖面高程约 82.9 m 处样品的年代为 $(13\ 000 \pm 1\ 100)$ aB.P.(表 1 剖面 4), 按上述沉积速率推算, 在高程约 75.76 m 处沉积物的年代约为 15 000 aB.P.。据此判断, 该剖面约 75 m 以下的基岩河槽为末次冰期最盛期的沂河河槽(图 7), 古河槽宽度约 704 m, 最深处在高程约 68.1 m 处到达基岩, 河槽最深约 6.9 m, 河槽宽深比为 102.03。在高程约 83 m 处沉积物的年代约为 12 000 aB.P., 约 83~75 m 处的河槽为晚冰期沂河河槽, 河槽宽约 784 m, 宽深比为 98。

在澳柯玛沂河大桥附近沂河西岸剖面, 埋深 2.49~2.55 m、2.28~2.34 m 处样品的年代结果分别是 $(4\ 030 \pm 230)$ aB.P.、 $(3\ 820 \pm 220)$ aB.P.(表 1 剖面 1), 两个样品点之间的平均沉积速率约为 95.3 cm/ka, 据此推算, 埋深约 12 m 处沉积年代约为 15 000 aB.P.。澳柯玛沂河大桥剖面东西两侧的地面高程约 97 m(图 6 中 ZK1 孔的孔口高程是 96.45 m), 按采样剖面的埋深年代推算, 高程约 85 m 处的沉积物年代约为 15 000 aB.P.。图 6 中 ZK15 孔处为基岩埋藏阶地, 高程为 84.95 m, 因此该断面约 84.95 m 以下的基岩河槽为末次冰期最盛期的古河槽。ZK7 孔到达基岩的高程是 81.83 m, 基岩河槽最大深度为 3.12 m, 最大宽度(图 6 中 ZK2—ZK15)为 471 m, 河槽宽深比为 150.96(表 2)。据上述年代推算, 埋藏基岩河槽的高程约 87.86 m 处沉积物年代约为 12 000 aB.P., ZK1 孔到达基岩的高程是 87.35 m, 河床也按相同的沉积速率计算, 高程约 87.35~85.45 m 的河槽为晚冰期(12 000 aB.P.)沂河河槽, 河槽宽约 540 m, 宽深比为 284.2。高程约 92.6 m 处沉积物的年代约为 7 000 aB.P., 约 92.6~90.2 m 的河槽为全新

世大暖期时的沂河河槽, 宽度约 550 m, 深约 2.4 m, 宽深比为 229.2。

洙阳村附近断面、澳柯玛沂河大桥附近断面现在河床下方的基岩河槽是末次冰期最盛期的沂河河槽, 据此判断, 其他断面现在河床下方的基岩河槽也应是末次冰期最盛期时的沂河河槽。芭山橡胶坝附近断面, 图 2 中 ZK3、ZK4 孔之间有相对较高的埋藏基岩, 高程约为 118 m, ZK9 孔到达基岩的高程约为 112.91 m, 基岩河槽的深度为 5.09 m, 宽度约 388 m, 宽深比为 76.23; 北社橡胶坝附近断面, 图 3 中 ZK1、ZK2 孔之间埋藏基岩阶地的高程约为 120 m, ZK3 孔到达基岩的高程为 114.20 m, 河槽的深度为 5.8 m, 宽度约 345 m, 宽深比为 59.48; 南王庄沂河大桥附近断面, 图 4 中 ZK5 孔处埋藏基岩阶地高程为 110.17 m, ZK10 孔处埋藏基岩阶地高程为 111.8 m, ZK9 孔到达基岩的高程为 107.80 m, 河槽深度约为 2.37 m, 宽度为 205 m, 宽深比约为 86.50; S336 沂河大桥附近断面, 图 5 中 ZK3 孔处埋藏基岩阶地高程为 96.60 m, ZK6 孔处基岩高程为 96.40 m, ZK11 孔到达基岩的高程是 93.10 m, 基岩河槽深度为 3.3 m, 宽度(图 5 中 ZK6—ZK14)为 478 m, 宽深比为 144.85。

3.2 古河道纵比降

芭山橡胶坝上游是山区, 往下进入准平原。各段古河道纵比降见表 3。

3.3 古河道类型

关于冲积河流的河型问题, Leopold and Wolman(1957)提出了著名的基于比降(J)和流量(Q)的判别关系: $J=0.012Q^{-0.44}$, 当给定 Q 时, 若 $J>0.012Q^{-0.44}$ 则发生分汊。这一关系在世界上得到了广泛应用, 但该关系式并没有对砂质河床和砾石河床进行区分, 也不能很好地适用于所有河流(Carson, 1984; 许炯心, 1999)。为了使所建立的关系具有广泛的代表性, 许炯心(2004)依据大量的冲积河流的资料, 建立了以比降(J)和河宽(W)来判别河型的新关系: $J=2.54W^{-1.44}$, $J>2.54W^{-1.44}$ 则为分汊型, $J<2.54W^{-1.44}$ 则为弯曲型; $J=0.0019W^{-0.25}$,

表 2 沂河中游段各断面末次冰期最盛期基岩河槽宽深比

Table 2 The incised valley's breadth depth ratio of each section in the LGM in the middle reaches of Yihe River

断面位置	古河槽标高/m		古河槽深度 /m	古河槽宽度 /m	宽深比
	槽顶标高	槽底标高			
沂水芭山橡胶坝	118.00	112.91	5.09	388	76.23
沂水北社橡胶坝	120.00	114.20	5.80	345	59.48
沂水南王庄沂河大桥	110.17	107.80	2.37	205	86.50
S336 沂河大桥	96.40	93.10	3.30	478	144.85
沂南澳柯玛沂河大桥	84.95	81.83	3.12	471	150.96
洙阳村附近断面	75.00	68.10	6.90	704	102.03

$J>0.0019W^{-0.25}$ 则为砾石河床, $J<0.0019W^{-0.25}$ 则为砂质河床。把河型分为砾石河床弯曲型、砾石河床分汊型、砂质河床弯曲型、砂质河床分汊型四类。

根据沂河中游各研究断面的形态, 河床宽度及河床比降情况见表 4。

根据许炯心比降与河宽的河型关系类别, 芭山橡胶坝附近、北社橡胶坝附近、南王庄沂河大桥、S336 沂河大桥、澳柯玛大道沂河大桥附近、洙阳村附近沂河古河槽均为砾石河床分汊型。

4 用河相关关系法计算沂河古流量

河流堆积物及其河床形态隐含着一系列的古水文信息, 借助于古河床形态及其堆积物等研究古水文是常用的研究手段之一。通过对河流古流量的研究, 可以反映出古河道的冲刷与沉积的演变过程, 对深入理解过去气候变化、讨论人类与环境变化的互动关系以及环境因素在文明形成中的作用都具有重要的意义。本文选择沂南县澳柯玛沂河大桥附近断面, 利用河相关关系法计算沂河古流量。

4.1 沂河古流量的计算

冲积河流通过自动调整作用处于平衡状态时, 其断面形态、纵剖面形态与流域因素之间存在某种定量的关系, 称之河相关关系(倪晋仁和张仁, 1992)。研究者提出了一系列计算古水文古流量的公式(Dury, 1965; Schumm, 1967)。Schumm 认为河床形态以及几何参数不仅取决于流量, 而且与河床周界的阻力有关, 不但考虑了动力(水流)与形态(河床形态)之间的关系, 还引入了物质(粉砂-黏土含量)这一变量, 较全面地探讨了三者之间的相互关系, 提出了一系列关系式, 例如河宽、河深、宽深比、曲

率、流量等关系式(曹银真, 1988):

$$P=3.5F^{-0.27} \quad SE=6\% \quad (1)$$

$$P=0.94M^{0.25} \quad SE=6\% \quad (2)$$

$$H=0.6M^{0.34}Q_m^{0.29} \quad SE=13\% \quad (3)$$

式中 M 为粉砂-黏土含量, H 为河深, F 为宽深比, P 为曲率, Q_m 为满槽流量, SE 为标准差。

葛沟水文站实测 1954—2007 年多年年均流量 $Q=40.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 。葛沟水文站附近沂河河槽宽度约 420 m, 河槽满槽深泓水深约 2.8 m, 宽深比 F 为 150, 根据式(1)计算得出 $P=0.903$, 根据式(2)计算得出 $M=0.852$, 根据式(3)计算得出 $Q_m=247 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算得出的满槽流量与实测多年平均流量的比值 $Q_m/Q=6.134$ 。

澳柯玛沂河大桥附近断面, 末次冰期最盛期沂河河槽, 宽度约 471 m, 河床底部有部分砂砾层沉积, 河槽深泓深度约 1.8 m, 宽深比 F 为 261.6, 计算得出 $P=0.779$, $M=0.472$, $Q_m=106.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 根据满槽流量与年均流量的比值计算得出 $Q=17.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。晚冰期(12 000 aB.P.)河槽宽约 540 m, 深泓深度约 1.8 m, 宽深比为 300, 计算得出 $P=0.75$, $M=0.406$, $Q_m=127.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 根据满槽流量与年均流量的比值计算得出 $Q=20.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。全新世中期(7 000 aB.P.)河槽宽约 550 m, 深泓深度约 2.2 m, 宽深比 250, 计算得出 $P=0.7875$, $M=0.532$, $Q_m=184.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 根据满槽流量与年均流量的比值计算得出 $Q=30.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.2 用气候模拟数值进行验证

4.2.1 末次冰期最盛期

末次冰期最盛期是目前国际上气候研究的热点之一, 许多学者对 LGM 时的气候进行了模拟研究。于革等(2000)用大气环流模式模拟的结果显示, 中国 40°N 以南、 90°E 以东地区的降水减少量在

表 3 末次冰期最盛期沂河中游古河道纵比降
Table 3 The longitudinal drop of the middle reaches of Yihe River at LGM

断面	断面之间的距离/km	相邻断面基岩最深处高程差/m	平均纵比降/%
芭山橡胶坝—北社橡胶坝	4.4	-1.29	-0.293
北社橡胶坝—南王庄大桥	1.5	6.40	4.267
南王庄大桥—S336 大桥	16.8	14.70	0.875
S336 大桥—澳柯玛沂河大桥	7.9	11.27	1.427
澳柯玛沂河大桥—洙阳断面	12.2	13.73	1.125

表 4 沂河各研究断面末次冰期最盛期河宽与河床比降
Table 4 The width and channel slope of each section at LGM

河槽断面	河床宽度(W)	河床比降(J)	$J=2.54W^{-1.44}$	$J=0.0019W^{-0.25}$
芭山橡胶坝	388	0.001 1	0.000 50	0.000 43
北社橡胶坝	345	0.001 2	0.000 60	0.000 44
沂水南王庄沂河大桥	205	0.002 4	0.001 19	0.000 50
S336 沂河大桥	478	0.000 9	0.000 35	0.000 41
澳柯玛沂河大桥	471	0.001 5	0.000 34	0.000 41
洙阳村断面	704	0.005 2	0.000 20	0.000 37

0.5~2 mm/d 之间, 气温比现在也低, 中高纬地区低 8~10℃, 低纬地区低 3~5℃; 郑益群等(2002)采用 NCAR 的第二代区域气候模式模拟中国东部 LGM 时降水显著减少, 长江淮河流域出现了一个中心达 1 mm/d 的降水减小区, 降温幅度在 4~12℃; 刘煜等(2007)用 CO₂ 和地球轨道参数的影响的模拟表明, 中国东部地区 LGM 时降水减少量达到 2 mm/d, 用大尺度环流背景场模拟我国华东地区降水减少量超过 1 mm/d; 陈星等(陈星等, 2000; 刘建等, 2002)用中国科学院大气物理研究所的含有陆面过程的 9 层 15 波菱形截断全球大气环流谱模式及其包含的陆面过程模拟了东亚地区 LGM 时的气候, 结果显示我国 20°~40°N、90°E 以东地区的降水减少量在 1~2 mm/d 之间; 钱云等(1998)建立了模式物理过程较为完善并引入了云量的反馈过程、海气和陆气简单耦合且和大气环流模式单向嵌套的东亚地区的区域气候模式, 模拟的我国东部地区 LGM 时降水减少量为 1.67 mm/d; 刘晓东(1995)模拟的 LGM 时江淮至华北地区年降水量减少 60%~70%。

综上所述, 沂河流域 LGM 时, 年平均气温约比现在低 4~5℃, 年降水量减少 1 mm/d 左右。葛沟水文站控制的沂河流域 5 565 km²(其中东汶河流域面积 2 427 km²), 年均温 12.8~14.0℃, 多年平均降水量约为 900 mm, 推算 LGM 时年均温为 7.8~10.0℃, 年降水量约 540 mm。

用王红亚和石元春(1992)建立的 T (气温)、 P (降水)与 R (年平均地表径流量)关系式:

$$R^{0.5}=7.29-0.65T+0.02P$$

(T 为 7.8~12.8℃、 P 为 203~3 048 mm) (4)

计算得出 R 值为 134.3~169.5 mm。根据澳柯玛沂河大桥控制的流域面积(不含东汶河, 约为 3 138 km²), 计算得出年均流量 $Q=13.35\sim16.84$ m³/s。

用河相关法计算的澳柯玛沂河大桥附近断面 LGM 时的年均流量(17.3 m³/s)比模拟值多了 2.7%。

4.2.2 全新世中期

全新世中期(7~6 kaB.P.), 全球季风环流系统普遍较现代增强, 夏季增温, 降水增多(施雅风等, 1992; 安芷生等, 1993)。陈星等(陈星等, 2000; 刘建等, 2002)进行的古气候模拟实验显示, 东亚地区在 40°N 以南地区, 6 kaB.P.时夏季平均气温比现在增加 2℃左右, 年均温比现在高约 0.5~1.5℃, 冬季也高 0.5~1.0℃。长江流域全新世中期, 夏季风强盛, 其影响区域可能比现今更向北向西扩张, 年平均气温普遍较现今高 2~4℃, 年降水量多 200 mm 以上(王开发等, 1983; 徐馨, 1989)。据此推断, 沂河流域全新世中期的年均温比现在高约 2.0℃, 约为

14.8~16.0℃。年降水量比现在多约 150~200 mm, 约为 1 050~1 100 mm。

根据王红亚和石元春(1992)建立的 T (气温)、 P (降水)与 R (年平均地表径流量)关系式:

$$R^{0.5}=7.71-0.79T+0.02P$$

(T 为 10.0~15.0℃、 P 为 229~2 032 mm) (5)

计算得出 R 值为 258.2~324.6 mm。根据澳柯玛沂河大桥控制的流域面积, 计算得出年均流量 $Q=25.69\sim32.34$ m³/s。

用河相关法计算的澳柯玛大桥附近断面全新世中期的年均流量(30.1 m³/s)在模拟值范围内。

5 结论

(1)现在沂河河床下方的基岩河槽为 LGM 时沂河古河槽, 各断面古河槽顶部、最深处的高程分别是: 芭山橡胶坝附近 118 m、112.91 m, 北社橡胶坝附近 120 m、114.2 m, 南王庄沂河大桥附近 110.17 m、107.8 m, S336 沂河大桥附近 96.6 m、93.1 m, 澳柯玛沂河大桥附近 84.95 m、81.83 m, 洙阳村附近 75 m、68.1 m。古河道纵比降较大(芭山—洙阳平均纵比降为 1.047‰, 下游洙阳—刘道口段平均纵比降为 0.359‰)。

(2)古河槽宽深比较大, 河槽宽浅, 属于砾石河床分汊(辫状)型。

(3)澳柯玛沂河大桥断面, 末次冰期最盛期、晚冰期、全新世中期古流量分别约为 17 m³/s、20 m³/s、30 m³/s。

致谢: 山东省第七地质矿产勘察院高级工程师焦永鑫, 工程师严根苗、徐磊、郭立帅等参加了野外考察及物探工作, 一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41372182), Natural Science Foundation of Shandong Province (No. 6011701512).

参考文献:

- 安芷生, 波特 S, 吴锡浩, 库茨巴赫 J, 王苏民, 刘晓东, 李小明, 王建, 周卫健, 肖家仪, 刘俊峰, 陆继军. 1993. 中国中东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁[J]. 科学通报, 38(14): 1302-1305.
- 曹光杰, 王建, 张学勤, 屈贵贤, 白世彪, 龚小辉. 2009. 末次冰期最盛期长江南京段河槽特征及古流量[J]. 地理学报, 64(3): 331-338.
- 曹光杰, 张学勤, 吴婷, 闫克超, 曹原. 2015. 末次冰期最盛期以来长江扬中段古河谷的沉积环境[J]. 冰川冻土, 37(6): 1627-1633.

- 曹光杰, 闫克超, 吴婷, 单婉婉, 刘卫国, 曹原. 2017. 末次冰期最盛期沂河汤头—刘道口段古河槽特征[J]. 地球学报, 38(4): 460-468.
- 曹银真. 1988. 古水文学及其研究方法[J]. 地理研究, 7(2): 94-102.
- 陈星, 于革, 刘健. 2000. 中国 21KaBP 气候模拟的初步试验[J]. 湖泊科学, 12(2): 154-163.
- 傅先兰, 李容全. 1998. 淮南地区淮河故道的初步研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 34(2): 276-279.
- 黄镇国, 张伟强, 蔡福祥. 1995. 珠江水下三角洲[J]. 地理学报, 50(3): 206-214.
- 李从先, 汪品先. 1998. 长江晚第四纪河口地层学研究[M]. 北京: 科学出版社: 111-160.
- 李从先, 张桂甲. 1995. 末次冰期时存在入海的长江吗?[J]. 地理学报, 50(5): 459-463.
- 李广雪, 刘勇, 杨子赓, 岳淑红, 杨文达, 韩喜彬. 2005. 末次冰期东海陆架平原上的长江古河道[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 35(3): 284-289.
- 刘健, 于革, 陈星, 王苏民. 2002. 中全新世和末次盛冰期东亚古气候的模拟[J]. 自然科学进展, 12(7): 713-720.
- 刘奎, 庄振业, 刘冬雁, 叶银灿, 胡广元. 2009. 长江口外陆架区埋藏古河道研究[J]. 海洋学报, 31(5): 80-88.
- 刘晓东. 1995. 下垫面强迫对东亚区域气候影响的研究[J]. 气象科学, 15(4): 57-63.
- 刘煜, 何金海, 李维亮, 陈隆勋. 2007. MM5 对末次盛冰期中国气候的模拟研究 II: 海陆分布, 植被和大尺度环流背景变化的影响[J]. 气象学报, 65(2): 151-159.
- 刘振夏, BERNE S, L'ATALANTE 科学考察组. 2000. 东海陆架的古河道和古三角洲[J]. 海洋地质与第四纪地质, 20(1): 9-14.
- 马建平. 1994. 嫩江下游右岸大安古河道的形成与演化[J]. 地理科学, 14(2): 194-196.
- 倪晋仁, 张仁. 1992. 河相关关系研究的各种方法及其间关系[J]. 地理学报, 47(4): 368-375.
- 钱云, 钱永甫, 张耀存. 1998. 末次冰期东亚区域气候变化的情景和机制研究[J]. 大气科学, 22(3): 283-293.
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1992. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. 中国科学(B 辑), 22(12): 1300-1308.
- 王恒松, 黄春长, 周亚利, 庞奖励, 查小春, 顾洪亮. 2012. 全新世古洪水事件光释光测年研究—以渭河下游临潼段为例[J]. 地球学报, 33(2): 227-235.
- 王红亚, 石元春. 1992. 长江下游流域第四纪古年地表径流量的估算——一种第四纪古水文学研究方法的应用尝试[J]. 第四纪研究, (4): 362-367.
- 王开发, 张玉兰, 蒋辉. 1983. 太湖地区第四纪沉积的孢粉组合及其古植被与古气候[J]. 地理科学, 3(1): 17-26, 96.
- 吴忱, 王子惠, 许清海. 1986. 河北平原的浅埋古河道[J]. 地理学报, 41(4): 332-340.
- 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.
- 夏东兴, 刘振夏. 2001. 末次冰期盛期长江入海流路探讨[J]. 海洋学报, 23(5): 87-95.
- 谢悦波, 费宇红, 沈起鹏. 2001. 古洪水水平流沉积与水位[J]. 地球学报, 22(4): 320-323.
- 徐馨. 1989. 我国东部晚第四纪气候演变[J]. 冰川冻土, 11(1): 10-19.
- 许炯心. 1999. 沙质河床与砾石河床水流及能耗特征的比较及其地貌学意义[J]. 科学通报, 42(1): 74-78.
- 许炯心. 2004. 基于对 Leopold-Wolman 关系修正的河床河型判别[J]. 地理学报, 59(3): 462-467.
- 杨达源. 1986. 晚更新世冰期最盛时长江中下游地区的古环境[J]. 地理学报, 41(4): 302-310.
- 杨怀仁, 徐馨, 杨达源, 黄家柱. 1995. 长江中下游环境变迁与地生态系统[M]. 南京: 河海大学出版社: 87-93.
- 于革, 陈星, 刘健, 王苏民. 2000. 末次盛冰期东亚气候的模拟和诊断初探[J]. 科学通报, 45(20): 2153-2159.
- 张祖陆. 1990. 鲁北平原黄河古河道初步研究[J]. 地理学报, 45(4): 457-466.
- 赵焕庭. 1982. 珠江三角洲的形成和发展[J]. 海洋学报, 4(5): 595-607.
- 郑益群, 于革, 王苏民, 薛滨, 刘华强, 曾新民. 2002. 区域气候模式对末次盛冰期东亚季风气候的模拟研究[J]. 中国科学(D 辑), 32(10): 871-880.

References:

- AN Zhi-sheng, PORTER S, WU Xi-hao, KUTZBACH. J, WANG Su-min, LIU Xiao-dong, LI Xiao-qiang, WANG Jian, ZHOU Wei-jian, XIAO Jia-yi, LIU Jun-feng, LU Ji-jun. 1993. Holocene climate suitable period and East Asian Summer Monsoon Change in East China[J]. Chinese Science Bulletin, 38(14): 1302-1305(in Chinese).
- BAKER V R, BENITO G, RUDOY A. 1993. Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia[J]. Science, 259: 48-350.
- CAO Guangjie, YAN Ke-chao, WU Ting, SHAN Wan-wan, LIU Wei-guo, CAO Yuan. 2017. Characteristics of the Yihe River paleo-valley in the Last Glacial Maximum in Tang-tou-Liudaokou Reach[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(4): 460-468(in Chinese with English abstract).
- CAO Guang-jie, CAO Yuan, WU Ting, YAN Ke-chao. 2016. Characteristics of the Yangtze River Incised Valley in the Last Glacial Maximum in Nanjing-Haimen Reach, China[J]. Environmental Earth Sciences, 75(1): 1-9, 27.
- CAO Guang-jie, WANG Jian, ZHANG Xue-qin, QU Gui-xian, BAI Shi-biao, GONG Xiao-hui. 2009. Characteristics and runoff volume of the Yangtze River's Paleovalley at Nanjing reach in the Last Glacial Maximum[J]. Acta Geographica Sinica, 64(3): 331-338(in Chinese with English abstract).
- CAO Guang-jie, ZHANG Xue-qin, WU Ting, YAN Ke-chao, CAO Yuan. 2015. Sedimentary Environment of the Yangtze River Paleo-valley in Yangzhong Reach since the LGM[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 37(6): 1627-1633(in Chinese).

- with English abstract).
- CAO Yin-zhen. 1998. Palaeohydrology and its research methods[J]. Geographical Research, 7(2): 94-102(in Chinese with English abstract).
- CARSON M A. 1984. The meandering-braided river threshold: a reappraisal[J]. Journal of Hydrology, 73: 315-334.
- CHEN Xing, YU Ge, LIU Jian. 2000. A preliminary simulation of climate at 21KaBP in China[J]. Journal of Lake Sciences, 12(2): 154-163(in Chinese with English abstract).
- COLEMAN J M, GAGLINO S M. 1964. Cyclic sedimentation in the Mississippi river delta plain[J]. Trans. Gulf coastal Cst. Ass. Geol. Soc., 14: 67-80.
- DURY G H. 1965. Theoretical implications of underfit streams[J]. Professional Paper-Geological Survey (U.S.), 452-B.
- FISK H N, MCFARLAND D J. 1955. Late quaternary deltaic deposits of the Mississippi river-local sedimentation and basin tectonics[J]. Geol. Soc. Am. Bull., Special Paper, 62: 279-302.
- FISK H N. 1961. Bar-finger sands of Mississippi delta/Blanc R. Modern delta[J]. AAPG Reprint Series, 18: 69-92.
- FU Xian-lan, LI Rong-quan. 1998. A preliminary study on the paleochannel of the Huaihe River in the Huannan area[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 34(2): 276-279(in Chinese with English abstract).
- GREEN A N. 2009. Palaeo-drainage, incised valley fills and transgressive systems tract sedimentation of the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean[J]. Marine Geology, 263: 46-63.
- HENK J A, BERENDSEN, ESTHER S. 2000. Late Weichselian and Holocene palaeogeography of the Rhine-Meuse delta, the Netherlands[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, (161): 311-335.
- HUANG Zhen-guo, ZHANG Wei-qiang, CAI Fu-xiang. 1995. The submerged Zhujiang delta[J]. Acta Geographica Sinica, 50(3): 206-214(in Chinese with English abstract).
- LEOPOLD L B, WOLMAN M G. 1957. River channel patterns: braided, meandering and straight[J]. U.S. Geological Survey Professional Paper, 282B: 39-85.
- LI C X, WANG P, SUN H P, ZHANG Jia-qiang, FAN Dai-du, DENG Bing. 2002. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution[J]. Sedimentary Geology, 152: 133-158.
- LI Cong-xian, WANG Pin-xian. 1988. Researches on stratigraphy of the late quaternary period in Yangtze River mouth[M]. Beijing: Science Press: 111-160(in Chinese).
- LI Cong-xian, ZHANG Gui-jia. 1995. A sea-running Changjiang River during the last glaciation?[J]. Acta Geographica Sinica, 50(5): 459-463(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-xue, LIU Yong, YANG Zi-geng, YUE Shu-hong, YANG Wen-da, HAN Xi-bin. 2005. The Paleo-channel of the Yangtze River on the continental shelf of east China sea at Last Glacial[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 35(2): 284-289(in Chinese).
- LIN C M, ZHUO H C, GAO S. 2003. Sedimentary facies and evolution in the Qiantang River incised valley, eastern China[J]. Marine Geology, 219: 235-259.
- LIU Jian, YU Ge, CHEN Xiang, WANG Su-min. 2002. Simulation of climate during the the Mid-Holocene and the Last Glacial Maximum in East Asia[J]. Progress in Nature Science, 12(7): 713-720(in Chinese with English abstract).
- LIU Kui, ZHUANG Zhen-ya, LIU Dong-yan, YE Yin-can, HU Guang-yuan. 2009. Study of the buried ancient channels in the continental shelf area out of the mouth of the Changjiang River in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 31(5): 80-88(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiao-dong. 1995. Influence of underlying surface forcing on the regional climate of East Asia[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 15(4): 57-63(in Chinese with English abstract).
- LIU Yu, HE Jin-hai, LI Wei-liang, CHEN Long-xun. 2007. MM5 simulations of the China regional climate of the LGM II: Influences of land area, vegetation, and large-scale circulation background[J]. Acta Meteorologica Sinica, 12(2): 151-159(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhen-xia, SERGE B, The L'ATALANTE Scientific Party. 2000. Paleochannels and Paleodeltas in the continental shelf of the Last China Sea[J]. Marine geology & Quaternary Geology, 20(1): 9-14(in Chinese with English abstract).
- MA Jian-ping. 1994. Formation and evolution of Da'an palaeochannels at Nenjiang River right bank downstream[J]. Scientia Geographica Sinica, 14(2): 194-196(in Chinese with English abstract).
- NI Jin-ren, ZHANG Ren. 1992. Methods and their relationships in studies of regime relations[J]. Acta Geoscientica Sinica, 47(4): 368-375(in Chinese with English abstract).
- OOMKENS E. 1974. Lithofacies relations in the late quaternary Niger delta complex[J]. Sedimentology, 21: 195-222.
- QIAN Yun, QIAN Yong-fu, ZHANG Yao-cun. 1998. Study on scenarios and mechanism of the regional climate change of East Asia in the Last Ice-age[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 22(3): 283-293(in Chinese with English abstract).
- SCHUMM S A. 1967. Palaeohydrology: Application of modern hydrologic data to problems of the ancient past[J]. International Hydrology Symposium (Fort Collins) Proceedings, 1: 185-193.
- SHEN Hong-yuan, YU Lu-peng, ZHANG Hong-mei, ZHAO Min, LAI Zhong-ping. 2015. OSL and radiocarbon dating of flood deposits and its paleoclimatic and archaeological implications in the Yihe River Basin, East China[J]. Quaternary Geochronology, 30(B): 398-404.
- SHI Ya-feng, KONG Zhao-chen, WANG Su-min, TANG Ling-yu, WANG Fu-bao, YAO Tan-dong, ZHAO Xi-tao, ZHANG Pi-yuan, SHI Shao-hua. 1992. Climate fluctuations and important events in Holocene warmth, China[J]. Science in China, Ser. B, 22(12): 1300-1308 (in Chinese).

- STARKEL L. 1993. Late Quaternary continental palaeohydrology as related to future environmental change[J]. *Global and Planetary Change*, 7: 95-108.
- WANG Heng-song, HUANG Chun-chang, ZHOU Ya-li, PANG Jiang-li, CHA Xiao-chun, GU Hong-liang. 2012. OSL dating of the Holocene Paleoflood events: a case study of the Lintong segment in the lower Weihe River valley[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(2): 227-235(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-ya, SHI Yuan-chun. 1992. Estimating annual runoff of quaternary past for the downstream catchment of Yangtze River: An application of an approach to quaternary palaeohydrology[J]. *Quaternary Sciences*, (4): 362-367(in Chinese with English abstract).
- WANG Kai-fa, ZHANG Yu-lan, JIANG Hui. 1983. Spore-pollen assemblages from the quaternary sediments of Taihu (lake) and its paleovegetation and paleoclimate[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 3(1): 17-26(in Chinese with English abstract).
- WU C, XU Q H, ZHANG X Q, MA Y H. 1996. Palaeochannels on the north China plain: Types and distributions[J]. *Geomorphology*, 18(1): 5-14.
- WU Chen, WANG Zi-hui, XU Qing-hai. 1986. The shallow buried paleochannels in Hebei plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 41(4): 332-340(in Chinese with English abstract).
- WU Chen, ZHU Xuan-qing, HE Nai-hua, XU Qing-hai, YUAN Wen-ying, WANG Zi-hui, SHI Der-rong, ZHAO Ming-xuan. 1991. Study on formed of paleochannels in Huabei plain[J]. *Science in China (Series B)*, (2): 188-197(in Chinese).
- XIA Dong-xing, LIU Zhen-xia. 2001. Tracing the Changjiang River's flowing route entering the sea during the last ice age maximum[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(5): 87-95(in Chinese with English abstract).
- XIE Yue-bo, FEI Yu-hong, SHEN Qi-peng. 2001. Slackwater deposits and flow peak level of a paleoflood[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(4): 320-323(in Chinese with English abstract).
- XU Jiong-xin. 1999. Comparison of Characteristics of Flow and Energy Consumption in Sandy River Beds and Gravel Beds and Their Geomorphological Significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(1): 74-78(in Chinese).
- XU Jiong-xin. 2004. Channel pattern discrimination based on the relationship between channel slope and width[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 59(3): 462-467(in Chinese with English abstract).
- XU Xin. 1989. Late quaternary climate changes in Eastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 11(1): 10-19(in Chinese with English abstract).
- YANG Da-yuan. 1986. The paleoenvironment of the mid-lower regions of Changjiang in the full-glacial period of Late Pleistocene[J]. *Acta Geographica Sinica*, 41(4): 302-310(in Chinese with English abstract).
- YANG Huai-ren, XU Xin, YANG Da-yuan, HUANG Jia-zhu. 1995. Environmental Changes and Ecosystem In the Yangtze River's Middle and Lower Reaches[M]. Nanjing: Hohai University Press: 87-93(in Chinese).
- YU Ge, CHEN Xing, LIU Jian, WANG Su-min. 2000. Simulation and diagnosis of East Asian climate in the Last Glacial Maximum[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(20): 2153-2159(in Chinese).
- ZHANG X, LIN C M, ROBERT W, GAO Shu, LI Yan-li. 2014. Facies architecture and depositional model of a macrotidal incised-valley succession (Qiantang River estuary, eastern China), and differences from other macrotidal systems[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126(3-4): 499-522.
- ZHANG X, ROBERT W, LIN C M. 2018. Facies and stratigraphic architecture of the late-Pleistocene to early-Holocene tide-dominated Paleo-Changjiang (Yangtze River) delta[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 130(3-4): 455-483.
- ZHANG Zu-lu. 1990. A preliminary study of the Yellow River's paleo-channels in north Shandong plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 45(4): 457-466(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Huan-ting. 1982. The formation and development of the Pearl River Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 4(5): 595-607(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yi-qun, YU Ge, WANG Su-min, XUE Bin, LIU Hua-qiang, ZENG Xin-min. 2002. Simulations of Last Glacial Maximum climate of East Asia by regional climate model[J]. *Science in China, Ser. D*, 32(10): 871-880(in Chinese).