

末次盛冰期长江南京段河槽特征及古流量

曹光杰¹, 王 建², 张学勤¹, 屈贵贤², 白世彪², 龚小辉²

(1. 临沂师范学院实验与教育技术中心, 山东 临沂 276005;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘要: 根据南京长江大桥、三桥、四桥的地质钻孔资料, 绘制南京段长江古河槽地质剖面示意图。对拟建南京长江四桥附近的四个钻孔进行了采样分析, 从钻孔沉积物样品的 ^{14}C 年代及阶地形成时间, 可以判断, 南京段约 -60m~-90m 的深槽为末次盛冰期时的长江河槽。钻孔揭示, 南京段长江古河槽狭窄陡峭, 呈 V 型, 在南京长江大桥附近形成局部深切。根据长江三桥、长江大桥附近古深槽断面形态及底部沉积物颗粒级配, 选用沙莫夫公式、河海大学公式等, 计算了末次盛冰期时河槽底部的泥沙起动流速及断面平均流速。根据流量—流速—过水断面之间的关系式, 计算得出末次盛冰期时长江的流量约为 12000~16000 m^3/s 。

关键词: 末次盛冰期; 长江南京段; 古河槽; 流速; 流量

1 引言

末次盛冰期最低海面时, 海面下降的幅度估算为 130 m 左右^[1, 2], 长江约在现今 -150~-160m 处注入大陆坡, 东海大陆架约有 500~600 km 露出水面^[3, 4]。由于基面大幅度下降, 导致长江下游河床发生强烈的溯源侵蚀, 形成末次盛冰期时的长江古河槽。杨怀仁等^[5]、杨达源^[6, 7]、郭蓄民^[8]等对末次盛冰期长江下游埋藏深槽及河道变迁等进行了研究; 李从先等^[9]、夏东兴等^[10]对末次盛冰期长江入海流路问题进行了探讨。杨怀仁等^[3]、方金琪^[11]指出南京附近古河谷除了地上的数级阶地外, 还有数级埋藏阶地, 高程分别是 -60 m、-40 m、-15~-20 m、-5.5 m^[3]左右; 临近的秦淮河古河底要比今河槽洼地低约 55 m, 秦淮河埋藏谷底沉积物测年为 21000 a BP^[12]。但对末次盛冰期长江南京段河槽特征, 尚缺乏系统的研究。

对于末次冰期海面变化幅度、河流随海面升降发生的侵蚀和加积现象已有了比较一致的认识。但是, 对于末次冰期中河流流量的估算却相对较少。Judith Maizels^[13]根据古河槽和古沉积估算了上新世—更新世古河流的满槽流量和洪峰流量; Sidorchuk 等^[14]利用古地理相似法估算了俄罗斯 Khoper River 古河槽的流量, 发现在冰缘环境下如果降水增加 20%, 就可能导致比现在大 7 倍的流量; Kemp Justine^[15]对南澳大利亚末次冰期古河槽进行了研究, 并估算在 34000 a BP 满槽流量为现在的 7-8 倍; Maizels^[16]、Williams^[17]、Rotnicki^[18]、Baker 等^[19]也根据古河槽形态与古沉积对不同时期的古流量进行了估算。中国科学院地理研究所^[4]将恢复的安庆附近的古河道形态参数和河床粗糙度代入曼宁公式, 估算出 5000 年前长江的平滩古流量为现在流量的 1.3 倍。然而到目前为止, 还没有见到有关长江下游末次冰期古流量的估算值。原因在于长江流域面积大, 气候、植被、地貌类型各处差异悬殊, 利用气象—水文关系经验模式和古地理相似法都很难估算长江干流的古流量。利用古河槽断面—流速法来估算流量, 又遇到了末次冰期古河槽形态恢复和年

收稿日期: 2008-10-25; 修订日期: 2008-12-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2003CB415201-8); 国家自然科学基金项目 (40871010) [Foundation: National Basic Research Program of China. No.2003CB415201-8; National Natural Science Foundation of China. No.40871010]

作者简介: 曹光杰 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向环境变化与机制。E-mail: guangjiecao@163.com

代确定的困难。本文拟根据钻孔资料，揭示南京段长江古河槽形态；根据古河槽形态、沉积物颗粒级配等，计算末次盛冰期时南京段长江的流量。

2 资料与方法

搜集整理南京长江大桥地质钻孔 23 个，长江三桥地质钻孔 89 个，拟建长江四桥附近地质钻孔 39 个。对同一大桥的工程钻孔资料，根据其地理坐标，在矢量化图上进行配准定位，选出在同一直线方向上的钻孔并计算钻孔之间的距离。根据钻孔的距离和钻孔的深度，确定横比例尺和纵比例尺。然后在确定的图幅上标出钻孔位置及各钻孔的深度和不同沉积层的厚度，绘出各跨江大桥附近长江横断面上的地质剖面简图。把绘制的地质剖面简图转换成栅格图像，再用 Mapinfo 软件，绘制各跨江大桥附近长江横断面上的地质剖面示意图。

在拟建长江四桥附近选择 4 个钻孔采集样品，样品在中科院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室进行 ¹⁴C 年代测定。根据年代判定末次盛冰期时的古河槽。

根据古河槽的形态、河槽底部沉积物颗粒级配等，选用适用的公式，计算流速、流量等。

3 末次盛冰期长江南京段古河槽分析

南京长江三桥、大桥、四桥附近钻孔揭示，南京段长江古河谷，均有数级埋藏阶地，约在 -60 m 以下有古深槽。末次盛冰期，长江镇江以上古河槽切割到基岩，槽中充填了卵砾石、粗砂^[3]。南京长江大桥附近古河谷埋深在 60 m 左右的阶地形成时间约为 12000 a BP^[3, 20]，拟建长江四桥附近古深槽左侧钻孔在约 63 m 埋深上沉积物经 ¹⁴C 年代测定为 14682±110 年。因此可以判断，古深槽是末次盛冰期时的长江河槽。

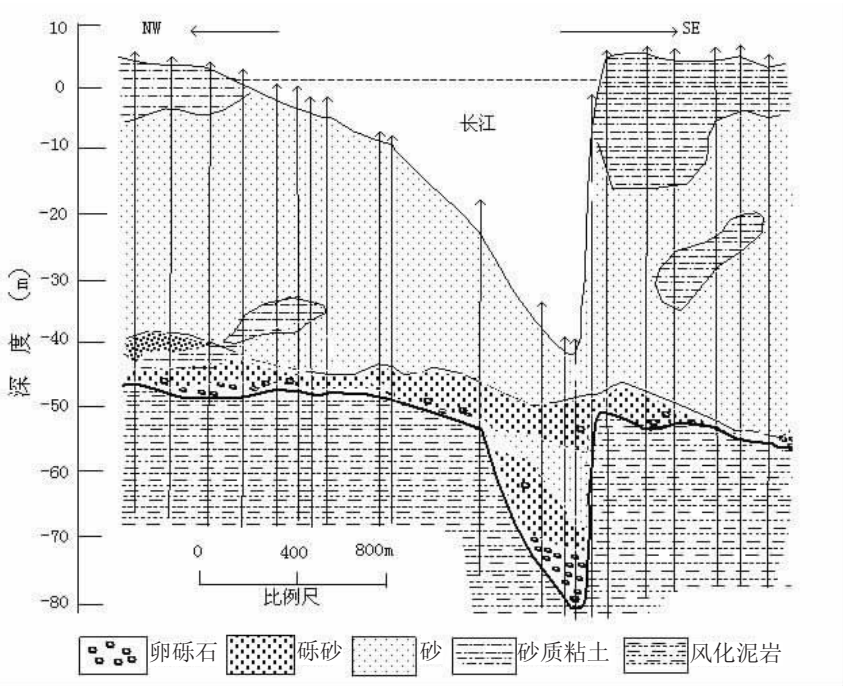


图 1 南京长江三桥附近长江古河槽地质剖面示意图

Fig. 1 The stratigraphical cross-section of the Yangtze River incised valley near the No.3 Nanjing Yangtze River Bridge

表 1 南京长江三桥附近长江古深槽底部沉积物颗粒级配情况

Tab. 1 Particle size grading of sedimentary in the Yangtze River incised-valley near the No.3 Nanjing Yangtze River Bridge

颗粒类型	颗粒组成 (%)						
	砾	砂粒			粉粒	粘粒	
单位 mm	> 2.0	2.0~0.50	0.50~0.25	0.25~0.10	0.10~0.05	0.05~0.005	< 0.005
样本数	4	4	4	4	4	4	4
平均值	56.88	15.47	6.35	6.30	15.00	0	0

南京长江三桥附近在现在河床下方的古深槽 (图 1)，最深处约在 -80.5 m 切割到基岩。根据钻孔揭示，古深槽槽顶宽约 515.3 m，按到达基岩的最深处计算古河槽深度约 28 m，宽深比 (\sqrt{B}/H) 约 0.811。古河槽沉积物自下而上是卵砾石—砾砂—中砂。底部的卵砾石层，成分与底部基岩岩性不同，且磨圆度较好，系长江搬运而来。根据河槽底部沉积物颗粒级配情况 (表 1)，计算得出平均粒径 $d \approx 5.88\text{ mm}$ ， $d_{90} \approx 31\text{ mm}$ ， $d_{95} \approx 40\text{ mm}$ 。古河槽是 V 形河槽，按三角形计算的满槽时过水断面面积约为 7214 m²。

南京长江大桥附近在现在河床左下方的古深槽 (图 2)，底部埋深在 -94 m 左右，深槽狭窄陡峭。根据钻孔揭示，古深槽槽顶宽约 325 m，按到达基岩最深处的深度计算，槽深约 29 m，宽深比 (\sqrt{B}/H) 约为 0.62。古深槽沉积物从下往上为卵、砾石—粗、中砂。底部的卵、砾石层，以石英岩和石灰岩为主，成分与底部基岩不同，系长江搬运而来。粒径 10~30 mm 者占 40~50%，50~60 mm 者占 20%^[21, 22]。根据河床底部的卵石、砾石层的颗粒级配情况，计算得平均粒径 $d \approx 19.5\text{ mm}$ ， $d_{90} \approx 55\text{ mm}$ ， $d_{95} \approx 60\text{ mm}$ 。古河槽是 V 形河槽，按三角形计算的过水断面面积约为 4712 m²。

南京长江四桥 (拟建) 附近，在现在河床北侧下方的古深槽 (图 3)，底部切割到强风化粉砂岩，埋深在 -90 m 以下。钻孔揭示，古深槽槽顶宽约 1040 m，按到达基岩最深处计算古河槽深约 27 m，宽深比 (\sqrt{B}/H) 约为 1.194。古河槽沉积物从下往上为圆砾石、砾砂—粗砂—中砂。

4 末次盛冰期长江南京段流速、流量的计算

选择南京长江三桥、大桥附近古河槽剖面，进行古长江流速、流量的计算。

4.1 泥沙起动流速的计算

泥沙起动流速表达方式自前苏联学者开创以来，已建立了许多适用于粗细泥沙的起

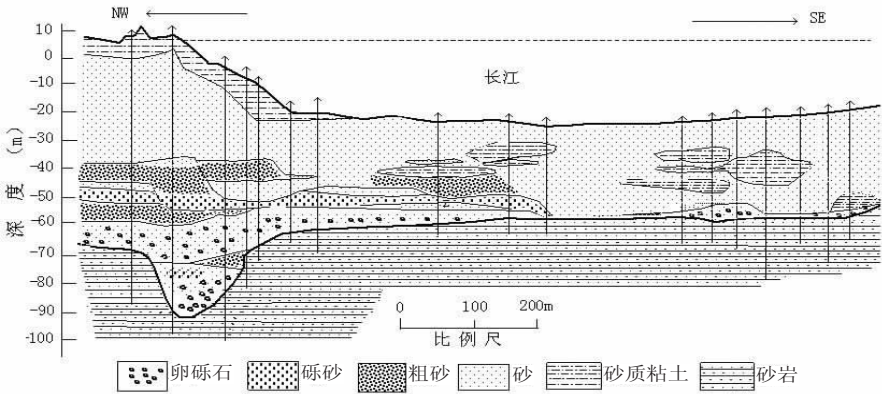


图 2 南京长江大桥附近长江古河槽地质剖面示意图

Fig. 2 The stratigraphical cross-section of the Yangtze River incised valley near the No.1 Nanjing Yangtze River Bridge

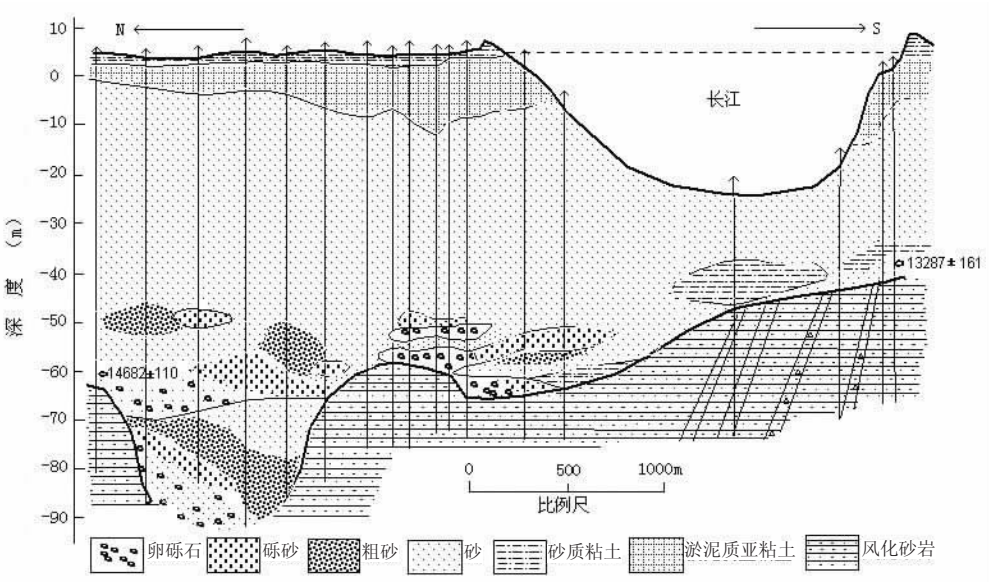


图 3 南京长江四桥 (拟建) 附近长江古河槽地质剖面示意图

Fig. 3 The stratigraphical cross-section of the Yangtze River incised valley near the No.4 Nanjing Yangtze River Bridge
动流速公式。主要有两大类：一是流速沿垂线呈指数分布，二是流速沿垂线呈对数分布。

流速沿垂线呈指数分布得出的起动流速的一般表达式为：

$$V_c = kd^{1/3}h^{1/6} \tag{1}$$

不同学者提出的公式中的系数 k 值不同，前苏联学者沙莫夫提出了适合泥沙粒径 $d > 0.2\text{ mm}$ 的起动流速公式，即：

$$V_c = 4.60d^{1/3}h^{1/6} \tag{2}$$

实践证明，当 K 值大约取 4.60 时，起动流速公式计算值与野外实测值符合较好。

流速沿垂线呈对数分布，比较著名的有河海大学公式 (适合泥沙粒径 $d > 0.5\text{ mm}$ 的床沙)：

$$V_c = 1.28\lg\left(13.15\frac{h}{d_{95}}\right)\sqrt{gd} \tag{3}$$

本文选用沙莫夫公式、河海大学公式，来计算末次盛冰期长江的泥沙起动流速。

南京长江大桥附近、三桥附近末次盛冰期深槽底部的泥沙粒径均符合沙莫夫公式和河海大学公式。把有关数据代入沙莫夫公式，计算得出南京长江大桥附近末次盛冰期时深槽底部的泥沙起动流速 $V_c \approx 2.169\text{ m/s}$ ，三桥附近深槽底部的泥沙起动流速 $V_c \approx 1.442\text{ m/s}$ 。把有关数据代入河海大学公式，计算得出南京长江大桥附近末次盛冰期时深槽底部的泥沙起动流速 $V_c \approx 2.150\text{ m/s}$ ，三桥附近深槽底部的泥沙起动流速 $V_c \approx 1.228\text{ m/s}$ 。

4.2 垂线平均流速的计算

床沙的起动主要靠河床底部的水流起动，河流流速在垂线上的分布一般呈弧形，由于风力、结冰、水内循环等的作用，最大流速不是在水面，而是在水面下某个深度 (约 $0.9\sim0.7\text{ h}$ 处)，向河床底部逐渐减小，因此泥沙的起动流速比垂线的平均流速要小的多。

起动流速 V_c 约等于作用于床面颗粒顶端的水流平均底速 \bar{u} 。水流平均底速 \bar{u} 与切应力，即摩阻流速 u_* 的关系，窦国仁^[23]表示为：

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 2.5\ln\left|1 + 20\frac{y}{\Delta}\right| + 7.05\left|\frac{20\frac{y}{\Delta}}{1 + 20\frac{y}{\Delta}}\right|^2 + 2.5\left|\frac{20\frac{y}{\Delta}}{1 + 20\frac{y}{\Delta}}\right| - 8.55 \tag{4}$$

式中： y 为距床面的垂直距离， Δ 为床面糙率高度。
起动底速与摩阻流速的关系一般采用如下的对数流速分布^[23]：

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 5.75\lg\left|30.2\frac{yx}{K_s}\right| \tag{5}$$

式中： K_s 为河床糙率高度，一般取 $K_s = d$ ， x 为校正系数，在床面粗糙区 $x = 1$ ， y 为距床面的距离，数值上一般取 $y = K_s = d$ 。则在床面颗粒的顶端，其水流平均底速为：

$$\bar{u} = 8.51u_* \tag{6}$$

垂线平均流速 V 与摩阻流速 u_* 之间有下列关系^[24]：

$$V \approx 6.5u_*\left|\frac{h}{d_{90}}\right|^{\frac{1}{6}} \tag{7}$$

把用式 (2)、(3) 计算得出的 V_c ，代入式 (6) 求出 u_* ，再用式 (7) 求算垂线平均流速 V 。

4.3 断面平均流速 (U) 的推算

现在长江河床的沉积物多为细砂，钻孔揭示的泥沙颗粒组成情况如表 2。根据泥沙颗粒级配情况，计算得出平均粒径 $d \approx 0.20\text{ mm}$ ， $d_{90} \approx 0.22\text{mm}$ 。现在长江大桥附近深泓洪水期的深度约 30 m，用式 (2) 计算得出 $V_c \approx 0.474\text{ m/s}$ ，代入式 (6)、(7)，求得洪水期主泓垂线平均流速 $V \approx 2.61\text{ m/s}$ 。现在实测长江南京段平均流速，洪水期一般约为 1.5~1.7 m/s。实测的长江断面平均流速与计算的深泓垂线平均流速的比值约为 0.57~0.65。末次盛冰期时计算所得的垂线平均流速与断面平均流速也按此比值加以推算。

4.4 流量的计算

河流流量 $Q = US$ ，式中 U 为断面平均流速， S 为过水断面面积。

4.5 计算结果

根据上述计算步骤，沙莫夫公式、河海大学公式等推算得出的结果如表 3。

4.6 计算结果的对比验证

对于长江古流量的估算，是首次尝试，因此有必要对结果的可信度进行对比验证。

4.6.1 同一断面用不同公式计算结果的对比 南京长江大桥附近末次盛冰期流量，用沙莫夫公式等计算的结果 (12652~14428 m³/s) 比用河海大学公式等计算的结果 (12553~14315 m³/s) 多了约 0.79%。

南京长江三桥附近末次盛冰期流量，用沙莫夫公式等计算的结果 (14038~16015 m³/s) 比用河海大学公式等计算的结果 (11966~13634 m³/s) 多了约 17.3%~17.4%。

两个公式计算的长江大桥附近流量相差 <1%，三桥附近流量的符合度也在 83%左右。

表 2 南京段长江现代河床泥沙颗粒级配情况

Tab. 2 Particle size grading of sediments for the modern river bed of the Yangtze's Nanjing reach								
取样深度范围 (m)	指标类别	沉积物颗粒组成 (%)						
		卵砾石	砂粒				粉粒	粘粒
		>2 mm	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005
2 m 厚度以内	样本数	7	7	7	7	7	7	7
	平均值	0.5	4.4	4.3	77.1	9.7	3.4	0.7
3 m 厚度以内	样本数	10	10	10	10	10	10	10
	平均值	0.3	3.1	3.2	78.9	10.0	3.9	0.6

表 3 南京长江大桥、三桥附近末次盛冰期流速、流量等计算结果

Tab. 3 The velocity of flow and runoff volume near the No.1 and No.3 Najing Yangtze River bridges at LGM

南京断面 位置	泥沙粒径 mm	断面 面积 (m ²)	沙莫夫公式计算结果				河海大学公式计算结果			
			Vc m/s	V m/s	U m/s	Q m ³ /s	Vc m/s	V m/s	U m/s	Q m ³ /s
大桥附近	d ≈ 19.5	4712	2.169	4.711	2.685~	12652~	2.150	4.674	2.664~	12553~
	d ₉₀ ≈ 55				3.062	14428			3.038	14315
	d ₉₅ ≈ 60									
三桥附近	d ≈ 5.88	7214	1.442	3.415	1.946~	14038~	1.228	2.91	1.659~	11966~
	d ₉₀ ≈ 31				2.22	16015			1.89	13634
	d ₉₅ ≈ 40									

4.6.2 不同断面同一公式计算结果的对比 用沙莫夫公式等计算的南京长江大桥附近末次盛冰期流量比长江三桥附近末次盛冰期的流量少了约 9.9%。

用河海大学公式等计算的南京长江大桥附近末次盛冰期的流量比长江三桥附近末次盛冰期的流量多了约 4.9~5.0%。

从计算结果看，两个断面上同一公式结果符合度均在 90%以上。

4.6.3 计算结果与末次盛冰期时降水量的验证 现在长江流域多年平均降水量约为 1100 mm，大通水文站控制流域面积约 $170.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2000 年长江泥沙公报)，控制流域内的年降水总量约 $187.6 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。大通站年径流总量约 $9051 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2000 年长江泥沙公报)，降水产生径流的比例约为 0.48。

我国第四纪研究的成果揭示，末次盛冰期时，长江流域大部分地区有效降水量比现在少，天均减少量约在 1~2 mm^[25-29]。因此，年降水量比现在要少约 350~700 mm。计算得出末次盛冰期时长江流域 (大通站以上) 年降水总量约为 $6820 \sim 12787 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，也按现在降水产生径流的比例进行计算，径流总量约 $3274 \sim 6138 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，计算得出流量约为 $10382 \sim 19463 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上述公式推算的结果在此范围内。

5 结论

(1) 南京段-60 m 左右以下的古深槽是末次盛冰期时的长江河槽

根据南京长江大桥附近古河谷埋深在 60 m 左右的阶地形成时间及拟建长江四桥附近古深槽左侧钻孔在约 63 m 埋深上沉积物的 ¹⁴C 年代 (14682 ± 110 年)，可以判断，约 -60~-90 m 的古深槽是末次盛冰期时长江河槽。古河槽狭窄陡峭，是 V 型河槽，古河槽在长江大桥附近形成局部深切 (古河槽槽底标高：三桥附近约 -80.5 m，大桥附近约 -94 m，四桥附近约 -90 m，润扬大桥附近约 -77 m)。

(2) 末次盛冰期时长江南京段的流量约为 12000~16000 m³/s

根据流量—流速—过水断面之间的关系式，计算得出末次盛冰期时长江南京段的流量约为 12000~16000 m³/s。大通站实测多年平均流量为 29192.9 m³/s (1954~2004 年)，计算的流量比现在多年平均流量少了 45.5%~58.9%。由于降水量比现在少，当然流量也小。

参考文献 (References)

[1] Yang Huai ren (ed.). Quaternary Geology. Beijing: Higher Education Press, 1987. [杨怀仁 主编. 第四纪地质. 北京: 高等教育出版社, 1987.]
[2] Lambeck Kurt. Late Pleistocene, Holocene and present sea-levels: Constraints of future change. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 1990, 89: 205-217.
[3] Yang Huai ren, Xu Xin, Yang Dayuan et al. Environmental Changes and Ecosystems in the Middle and Lower Yangtze River. Nanjing: Hohai University Press, 1995. 86-93. [杨怀仁, 徐馨, 杨达源 等. 长江中下游环境变迁与地生态系统.]

南京: 河海大学出版社, 1995. 86-93.]

- [4] Institute of Geography, CAS, Yangtze River Institute of Water Resources and Hydro-Power Research. Channel Properties and Evolution in the Yangtze River's Middle and Lower Reaches. Beijing: Science Press, 1985. 60-61. [中国科学院地理研究所, 长江水利水电科学研究院. 长江中下游河道特性及其演变. 北京: 科学出版社, 1985. 60-61.]
- [5] Yang Huai ren, Han Tongchun, Yang Dayuan et al. Processes and causal mechanism of migrations of the Changjiang since Late Pleistocene. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1983, (2): 341-350. [杨怀仁, 韩同春, 杨达源等. 长江下游晚更新世以来河道变迁的类型与机制. 南京大学学报(自然科学版), 1983, (2): 341-350.]
- [6] Yang Dayuan. Changes of water level in the mid-lower reaches of the Changjiang River since the end of Late Pleistocene. Quaternary Sciences of China, 1989, 8(1): 114-119. [杨达源. 晚更新世末期以来长江中下游的水位变化. 中国第四纪研究, 1989, 8(1): 114-119.]
- [7] Yang Dayuan. The paleoenvironment of the mid-lower regions of Changjiang in the full-glacial period of Late Pleistocene. Acta Geographica Sinica, 1986, 41(4): 302-310. [杨达源. 晚更新世冰期最盛时长江中下游地区的古环境. 地理学报, 1986, 41(4): 302-310.]
- [8] Guo Xumin. Evolution of sedimentary environment of the Changjiang Estuary area since the late stage of late Pleistocene. Chinese Journal of Geology, 1983, 18(4): 402-408. [郭蓄民. 长江河口地区晚更新世晚期以来沉积环境的变迁. 地质科学, 1983, 18(4): 402-408.]
- [9] Li Congxian, Zhang Guijia. A sea-running Changjiang River during the Last Glaciation? Acta Geographica Sinica, 1995, 50(5): 459-463. [李从先, 张桂甲. 末次冰期时存在入海的长江吗? 地理学报, 1995, 50(5): 459-463.]
- [10] Xia Dongxing, Liu Zhenxia. Tracing the Changjiang River's flowing route entering the sea during the Last Glacial Maximum. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(5): 88-95. [夏东兴, 刘振夏. 末次冰期盛冰期长江入海流路探讨. 海洋学报, 2001, 23(5): 88-95.]
- [11] Fang Jinqi. The numerical analog of the sea-level rise affecting the Yangtze River middle and lower reaches since late ice age. Science in China (Series B), 1990, 20(8): 870-878. [方金琪. 晚冰期以来海面上升对长江中下游河段影响的数值模拟. 中国科学(B 辑), 1990, 20(8): 870-878.]
- [12] Jiang Sishan, Ang Chaohai, Yang Huicheng et al. Primary study on the Qinhuai River incised-valley and era of sediment in Nanjing. Acta Geologica Sinica, 1986, 60(1): 89-99. [蒋斯善, 昂潮海, 杨惠成等. 南京市秦淮古河道及沉积物时代的初步研究. 地质学报, 1986, 60(1): 89-99.]
- [13] Judith Maizels. Raised channel systems indicators of palaeohydrologic change: A case study from Oman. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1990, 76(3/4): 241-277.
- [14] Sidorchuk A Yu, Borisova O K. Method of paleogeographical analogues in paleohydrological reconstructions. Quaternary International, 2000, 72(1): 95-106.
- [15] Kemp Justine. Evidence for regionally wet conditions before the LGM in southeast Australia: OSL ages from a large palaeochannel in the Lachlan Valley. Journal of Quaternary Science, 2007, 22(5): 423-427.
- [16] Maizels J K. PalaeoveLOCITY and palaeodischarge determination for coarse gravel deposits. In: Gregory, K (ed.). Background to Palaeohydrology. Chichester: Wiley, 1983. 101-139.
- [17] Williams G P. Paleofluvial estimates from dimensions of former channels and meanders. In: Baker V et al. (eds.). Flood Geomorphology. Chichester: Wiley, 1988. 321-334.
- [18] Rotnicki K. Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous rivers and its palaeoclimatic implications. In: Starkel L et al. Temperate Palaeohydrology. Chichester: Wiley, 1991. 431-470.
- [19] Baker V R, Benito G, Rudoy A. Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding Altay Mountains, Siberia. Science, 1993, 259: 48-350.
- [20] Zhu Yongqi. Primary study on the physiognomy in East China Sea continental shelf. In: Study Collection on the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1984. 65-70. [朱永其. 东海陆架初步研究. 东海研究文集. 北京: 海洋出版社, 1984. 65-70.]
- [21] Cao Guangjie, Wang Jian, Xiong Wanying et al. Sedimentary characteristics of the Yangtze River's paleovalley in Nanjing since the Last Glacial Maximum. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(1): 23-28. [曹光杰, 王建, 熊万英等. 长江南京段末次盛冰期以来的古河谷沉积. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 23-28.]
- [22] Cao Guangjie, Wang Jian, Qu Guixian. Formation & sedimentary characteristics of the Yangtze River incised-valley in Nanjing. Journal of Henan University (Natural Science), 2006, 36(1): 66-69. [曹光杰, 王建, 屈贵贤. 南京长江大桥附近长江古河谷的形成与沉积特征. 河南大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 66-69.]
- [23] Dou Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment. Journal of Sediment Research, 1999, (6): 1-9. [窦国仁. 再论泥沙起动流速. 泥沙研究, 1999, (6): 1-9.]
- [24] Han Qiwei, HE Mingmin. The Incipient Disciplinarian and Incipient Velocity of Sediment. Beijing: Science Press, 1999. [韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速. 北京: 科学出版社, 1999.]

- [25] Yu Ge, Chen Xing, Liu Jian et al. Simulation and diagnosis of East Asian climate in the Last Glacial Maximum. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(20): 2153-2159. [于革, 陈星, 刘建 等. 末次盛冰期东亚气候的模拟和诊断初探. *科学通报*, 2000, 45(20): 2153-2159.]
- [26] Zheng Yiqun, Yu Ge, Wang Sumin et al. Simulations of Last Glacial Maximum climate of East Asia by regional climate model. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(10): 871-880. [郑益群, 于革, 王苏民 等. 区域气候模式对末次盛冰期东亚季风气候的模拟研究. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(10): 871-880.]
- [27] Liu Yu, He Jinhai, Liu Weiliang et al. MM5 simulations of the China regional climate of the LGM: II: Influences of changes of land area, vegetation, and large-scale circulation background. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65 (2): 151-159. [刘煜, 何金海, 李维亮 等. MM5 对末次盛冰期中国气候的模拟研究. *气象学报*, 2007, 65(2): 151-159.]
- [28] Liu Jian, Yu Ge, Chen Xing et al. Simulation of climate during the the mid-Holocene and the Last Glacial Maximum in East Asia. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(7): 713-720. [刘建, 于革, 陈星 等. 中全新世和末次盛冰期东亚古气候的模拟. *自然科学进展*, 2002, 12(7): 713-720.]
- [29] Qian Yun, Qian Yongfu, Zhang Yaocun. Study on scenarios and mechanism of the regional climate change of East Asia in the Last Ice-age. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(3): 283-293. [钱云, 钱永甫, 张耀存. 末次冰期东亚区域气候变化的情景和机制研究. *大气科学*, 1998, 22(3): 283-293.]

Characteristics and Runoff Volume of the Yangtze River's Paleovalley at Nanjing Reach in the Last Glacial Maximum

CAO Guangjie¹, WANG Jian², ZHANG Xueqin¹,
QU Guixian², BAI Shibiao², GONG Xiaohui²

(1. *Experiment & Education Technology Center, Linyi Normal University, Linyi 276005, Shandong, China;*

2. *School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)*

Abstract: Three cross-sections of paleovalley depositional sequences were established with references of hundreds of bore data and documents of the No.3, No.1 and No.4 Nanjing Yangtze River bridges. Through analyzing age results of ¹⁴C from samples of four drilling cores near the No.4 Nanjing Yangtze River Bridge (to be built), we can find that the time range of paleovalley is dated LGM at a depth of -60~-90 m near Nanjing. It is also indicated that the deep incised-valley channel was narrow and the river flew swiftly. The ancient Yangtze River deep channel presented partially and deeply incised features near the No.1 Nanjing Yangtze River Bridge. According to previous publications, much research has been done on the main paleochannel of the Yangtze River, but few results have been achieved on discharge estimation. In this paper, the incipient velocity and average velocity of the LGM

was calculated with $V_c = 4.60d^{1/3}h^{1/6}$, $V_c = 1.28\lg\left(13.15\frac{h}{d_{95}}\right)\sqrt{gd}$, $V \approx 6.5u_*\left|\frac{h}{d_{90}}\right|^{\frac{1}{6}}$, etc.,

in terms of the river shape, sedimentary grain size and sequences near the No.3 and No.1 Nanjing Yangtze River bridges. Moreover, the discharge in Nanjing reach of the Yangtze River during the LGM has been estimated to be around 12000~16000 m³/s according to the relationship of discharge, velocity of flow and cross-section.

Key words: The Last Glacial Maximum; Nanjing reach of the Yangtze River; paleovalley; velocity of flow; runoff volume