

# 江西庐山牧马场剖面泥砾堆积物的成因分析及年代测定

陈安东<sup>1,2)</sup>, 田明中<sup>1)</sup>, 赵志中<sup>2,3)\*</sup>, 钱方<sup>2)</sup>, 张志光<sup>3)</sup>

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3) 中国地质科学院, 北京 100037

**摘要:** 庐山第四纪泥砾堆积物成因争论是庐山第四纪冰川争论的焦点之一。对新发现的庐山牧马场泥砾剖面进行了石英砂电镜扫描(SEM)和成因分析, 并初步进行了电子自旋共振(ESR)年代测定。石英砂电镜扫描表明该剖面泥砾堆积物为冰川和流水共同作用形成, 并在后期湿热化影响下导致部分化学特征明显; ESR测年数据表明该剖面形成于中更新世晚期(225.5±20)~(242.6±24) ka BP, 与推测的时代(庐山冰期)基本一致。根据测试结果, 作者认为庐山牧马场剖面具有第四纪冰川作用的痕迹, 但其时代和规模尚有待探讨改进。

**关键词:** 庐山; 第四纪冰川; 冰碛泥砾; 石英砂电镜扫描; ESR测年

中图分类号: P512.4; P575.1; P581 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.01.14

## Genetic Type Analysis and ESR Dating of Quaternary Deposits along the Mumachang Profile in the Lushan Mountain in Jiangxi Province

CHEN An-dong<sup>1,2)</sup>, TIAN Ming-zhong<sup>1)</sup>, ZHAO Zhi-zhong<sup>2,3)\*</sup>,  
QIAN Fang<sup>2)</sup>, ZHANG Zhi-guang<sup>3)</sup>

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

3) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

**Abstract:** Quaternary morainic deposits in the Lushan Mountain has long been one of the controversial subjects. The authors used Scanning Electron Microscopy (SEM) to analyze the shape and texture of the quartz sand grains along the Mumachang profile, identified the genetic types, and applied Electron Spin Resonance (ESR) dating to determine their age. The SEM analysis confirms that the deposits was glacial and glaciofluvial sediments; the ESR dating indicates that it was formed at the late stage of Middle Pleistocene (225.5±20)~(242.6±24) ka BP, equivalent to the Lushan Glaciation. According to the experiment, the authors are of the opinion that there exist glacial traces in the Mumachang profile, but the timing and extent remains to be investigated and further improved.

**Key words:** Lushan Mountain; Quaternary glaciation; glacial deposit; Scanning Electron Microscopy; ESR dating

庐山第四纪冰川的研究始于20世纪30年代初, 1933年李四光在中国地质学会第十次年会上作了《扬子江流域之第四纪冰期》的学术报告, 提出在第四纪期间庐山发生过冰川作用, 文章随后刊出

(Lee, 1934)。庐山第四纪冰川理论自提出之始, 就受到与会中外专家的质疑, 此后争论至今已有80年整。关于庐山第四纪冰川的争论, 主要是由于庐山海拔不高(最高峰汉阳峰海拔1474 m), 纬度较低(北

本文由中国地质大学(北京)基本科研业务费专项资金项目(编号: 2011YYL016)资助。

收稿日期: 2013-06-24; 改回日期: 2013-09-13。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 陈安东, 男, 1987年生。博士研究生。主要从事第四纪地质与第四纪环境研究。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)。电话: 010-68486778。E-mail: anton.chen@163.com。

\*通讯作者: 赵志中, 男, 1966年生。研究员。主要从事第四纪地质与第四纪环境研究。E-mail: zhaozz2006@gmail.com。

纬 29°28′—29°45′), 第四纪期间降温幅度和环境状况及雪线高度存在争议。争论焦点在于庐山第四纪泥砾堆积物成因, 地貌塑造因素, 以及第四纪气候状况和雪线高度。支持庐山第四纪冰川论者多从侵蚀地貌遗迹和堆积物等方面提出证据(何培元等, 1992), 认为庐山在第四纪期间发生过冰川作用; 而不同意见者(施雅风等, 1989, 2011)则多基于中国西部第四纪冰川的研究成果, 与东部第四纪冰川进行对比, 认为庐山的地貌遗迹非冰川作用所致; 第四纪泥砾堆积物是融冻泥流、坡积、洪积和泥石流等堆积; 第四纪期间庐山不具备冰川发育的气候条件。本文从庐山第四纪沉积物研究中提出证据, 对庐山上新发现的牧马场泥砾堆积物剖面进行了石英砂电镜扫描和成因分析, 并进行了 ESR 年代测定。

庐山(北纬 29°28′—29°45′, 东经 115°50′—116°10′)位于江西省北部, 东临鄱阳湖, 西至九江县, 南抵星子县, 北距长江约 13 km(图 1)。庐山山体呈北东—南西走向, 山体长约 25 km, 宽约 10 km, 最高峰为汉阳峰, 海拔 1474m。庐山地处亚热带季风气候区, 年平均气温 11.5℃, 年降水量 1800 mm 左右, 年均雾日 190 天。

庐山地区地层发育比较齐全, 岩浆岩也有一定分布(何培元等, 1992)。区内最老的地层是中元古界双桥山群, 为一套浅海相泥质碎屑岩, 具有一定程度的变质, 主要分布于山体东南麓。震旦系地层主要由长石石英砂岩、冰碛岩及硅质岩组成, 见于五老峰、女儿城和蔡家岭等地。寒武系地层由砂泥质

沉积岩和碳酸盐等组成, 主要呈北东向带状分布于山麓地带。奥陶系为一套浅海相碳酸盐沉积, 主要见于山麓高垄、通远等地。志留系地层由一套浅海相碎屑岩组成, 见于通远至九江沙河街以及高垄一带。此外, 还有泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系地层零星出露。第四系地层广泛分布于山体以东、以西及西北部地区(何培元等, 1992)。

牧马场剖面位于庐山西麓, 东南向距汉阳峰约 5.7 km, 东北向距芦林湖约 2.4 km。剖面位于牧马场建筑工地后面的护坡上, 坐标 29°32.273′N, 115°56.762′E(图 1), 剖面底部海拔高度 1042 m, 剖面高 11.2 m, 其下未见底。剖面上堆积棕红色泥砾层, 砾石大小混杂, 变化很大, 无层次, 分选很差, 最大砾径 0.8 m, 一般砾石直径在 0.05~0.30 m 之间。砾石主要成分为石英砂岩、变质石英砂岩、板岩、泥岩, 具棱角至次棱角状, 较大块砾石磨圆较好, 呈圆状。顶部为现代土壤层覆盖, 底部左侧可见基岩出露, 与震旦系南沱组砂岩为不整合接触。

该堆积物呈垄状, 剖面前端因修建护坡挖开, 从剖面由下到上采样, 距底部高度分别为 1.7 m、4.1 m、6.7 m、7.2 m 和 9.3 m, 编号 BP01 至 BP05(图 2)。

## 1 石英砂电镜扫描和成因分析

石英砂表面形态是研究沉积物的沉积环境和沉积相的重要方法之一。石英硬度较大, 化学性质稳定, 可以记录在搬运和沉积过程中因外力作用造成的形貌特征, 从而反映沉积环境和沉积相(陈丽

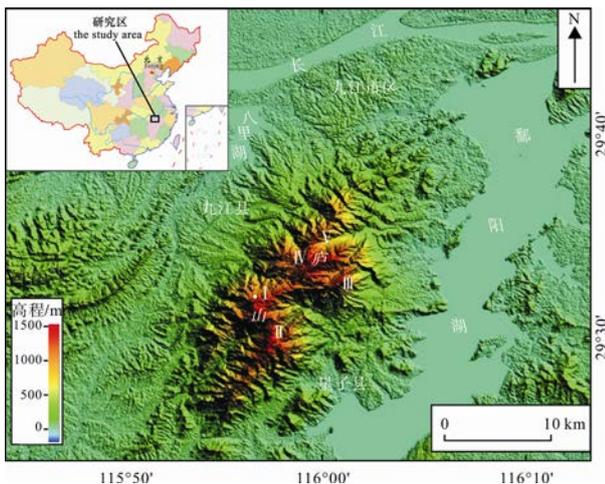


图 1 庐山基本位置图以及采样点位置图

Fig. 1 Location of the Lushan Mountain and sampling site

I - 采样点牧马场; II - 汉阳峰; III - 五老峰; IV - 牯岭镇;  
V - 王家坡; DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心  
国际科学数据服务平台 <http://datamirror.csdb.cn>

I - the sampling site Mumachang; II - Hangyangfeng;  
III - Wulaofeng; IV - Guling Town; V - Wangjiapo; DEM data set  
is provided by International Scientific Data Service Platform,  
Computer Network Information Center, Chinese Academy  
of Sciences. <http://datamirror.csdb.cn>



图 2 牧马场剖面采样点位置

Fig. 2 Sampling sites on the Mumachang profile

华等, 1986)。在不同的搬运介质和动力条件下, 形成的石英颗粒表面的形貌特征组合也不同。单一的某个形貌特征可能会由不同的搬运和沉积过程形成, 因此在成因划分中要对形貌特征组合进行综合统计, 才能更合理地地区分沉积环境。对石英砂进行电镜扫描, 统计出具有某种形貌特征的颗粒出现频率, 对比其出现频率和组合特征, 从而辨别其沉积环境和沉积相。

### 1.1 样品处理流程

将每个样品分别过筛, 挑选出 0.2~0.3 mm 粒级的样品。筛分后的样品经浓盐酸浸泡 5 h, 然后用蒸馏水反复冲洗、烘干。处理后的样品置于双目镜下, 每个样品随机挑选石英砂 25 粒左右, 均匀粘放在透明胶纸上。然后将样品置于标准真空镀膜仪中, 镀上一层导电金膜。最后将样品置于扫描电镜下观察形貌特征, 统计具有某种形貌特征颗粒的出现频率。

在观察统计过程中, 参考前人对石英砂形貌特征和成因分类(吴锡浩等, 1997; 谢又予等, 1981), 我们提取 39 个能代表各种成因环境的典型特征变量, 分别从颗粒形状、边缘特征、起伏、机械特征和化学特征等方面加以分类, 划分出化学特征、风成成因、水流成因、冰川成因四种成因类型(表 1)。其中, 编号 1 至 9 为化学特征独有的形貌特征, 编号 10 至 14、21 至 22、27 至 39 分别为风成成因、水流成因、冰川成因独有的形貌特征, 编号 15 至 20、23 至 26 分别为风成成因与水流成因、水流成因与冰川成因共有的形貌特征。对实验结果进行半定量统计, 计算出各特征颗粒出现频率(表 1), 特征出现频率大于 75% 为“常见”, 25%~75% 的为“见有”, 2%~25% 的为“偶见”, 出现频率小于 2% 为极少量出现甚至不出现。

### 1.2 形貌特征组合和成因分析

据观察统计, 该剖面的 5 个样品中, 棱角状和次棱角状石英颗粒所占比例都在 80% 以上, 石英颗粒的磨圆度都不高。石英颗粒磨圆取决于机械磨圆和化学溶蚀, 以机械磨圆为主(陈丽华等, 1986)。该剖面石英颗粒磨圆度不高的原因主要有两个: 剖面位于山上海拔 1000 m 以上, 距离山顶和源地不远, 搬运距离有限, 机械磨圆所造成的影响不大; 化学溶蚀作用较弱, 未能对石英颗粒磨圆度造成较大影响。

5 个样品中, 石英颗粒常见无定形硅沉淀和硅质薄膜(图版 I-A), 部分样品中偶见硅质鳞片(图版 I-B)和鳞片状剥落(图版 I-C), 除 BP02 以外均未见蜂窝状溶蚀, 未见氧化硅晶体生长。反映部分化学沉淀作用发育, 化学溶蚀作用对石英颗粒影响不大,

晶体生长作用较弱。

机械作用造成的表面形态中, 作为风成成因代表的翻卷解理薄片(图版 I-D)的频率较高, 但是其他风成成因所独有的形貌特征所占的频率较小; 水流成因的形貌特征频率较高, 小撞击坑和机械 V 形坑(图版 I-E, I-C)在 5 个样品中均比较发育; 冰川成因所造成的形貌特征均占一定比例, 石英颗粒表面偶见或见有擦痕(图版 I-F), 偶见冰川成因典型代表的粘附碎片(图版 I-G, I-H)。反映了沉积物风成成因作用特征发育不明显, 水流成因与冰川成因共同作用下的组合特征普遍发育, 其中以水流成因作用为主, 应属于冰川-冰水环境。

## 2 ESR 年代测定

ESR 年代测试是目前第四纪沉积物测年中比较成熟的一种测年方法, 可以用来测定第四纪冰川沉积物(朱大岗等, 2005)、黄土(林敏等, 2005)、河湖相沉积物(朱大岗等, 2006; 王令占等, 2012)等的沉积年龄, 也可以测定断层活动的年龄(张仲培等, 2007)。早期对庐山第四纪冰期划分中, 受技术手段限制, 多根据沉积物特征和地形地貌特征进行地层年代学划分。何培元等(1992)对庐山第四纪堆积物进行了磁性地层年代划分, 赵志中等(2012)将其与欧洲阿尔卑斯地区和北美地区进行了对比。但是, 经典的四次冰期模式已经被多重冰期所取代, 黄土和深海氧同位素均记录了多个冷暖旋回。并且, 目前国际上更加重视对中、晚更新世冰川年代的研究(Ehlers et al., 2007), 因此, 对庐山更新世第四纪堆积物进行精确的绝对年代学测年显得十分必要。

### 2.1 ESR 测年基本原理

ESR 年代测试所测得的年龄是石英 ESR 信号“回零”后埋藏至今的年龄, 曝光和热事件均可以使石英 ESR 信号“回零”(尹功明等, 2005)。石英颗粒被埋藏后, 晶体受到周围放射性元素( $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ )衰变产生射线的辐射, 辐射损伤产生顺磁中心。在一定辐射环境下, 顺磁中心从沉积物埋藏时开始积累, 石英晶体接受的辐射总剂量与辐射时间成正比。测定出样品的年辐射剂量和总辐射剂量, 样品的 ESR 年龄可按照以下公式计算:

$$\text{ESR 年龄} = \text{积累剂量(TD)} / \text{年剂量(Dy)}$$

样品辐射剂量的计算中还要考虑宇宙射线强度(Granger et al., 2001), 本样品采样位置位于地面以下位置较深, 宇宙射线辐射的影响基本可以忽略。

### 2.2 年代测定结果

根据前人对该区域的研究(张兰庭, 1984), 结合

表 1 石英砂形貌特征的频率统计及成因分析  
Table 1 Surface texture features of quartz sand grains and analysis of genetic types

成因分类	表面结构		出现频率/%				
	编号	形貌特征	BP01	BP02	BP03	BP04	BP05
化学	1	鳞片状剥落	12	8	4	0	4
	2	氧化硅结晶	0	0	0	0	0
	3	无定形硅沉淀	100	92	100	100	100
	4	硅质薄膜	80	88	76	100	100
	5	硅质鳞片	4	0	4	0	8
	6	硅质球	0	4	4	8	4
	7	蜂窝状溶蚀	0	44	0	0	0
	8	定向蚀坑	0	0	0	0	0
	9	蚀坑和蚀缝	0	0	8	4	0
风成	10	波曲脊	0	0	0	0	0
	11	翻卷解理薄片	32	24	20	8	32
	12	盘形凹面坑	0	0	0	16	16
	13	很圆	0	0	0	0	0
	14	圆	4	0	0	0	4
风成及水流	15	磨圆边缘	0	0	0	0	0
	16	低起伏	24	12	12	24	12
	17	亚圆边缘	28	20	36	24	36
	18	次圆	24	0	36	24	32
	19	水下磨光面	0	0	0	0	0
	20	小撞击坑	100	100	76	96	100
水流	21	直曲沟	0	0	4	12	8
	22	机械 V 形坑	82	100	56	68	96
水流及冰川	23	中起伏	12	16	36	28	20
	24	次棱脊	52	72	48	64	44
	25	次棱角	58	64	52	60	44
	26	小贝壳状断口	4	4	0	4	0
冰川	27	粘附碎片	8	12	4	16	12
	28	裂隙	24	16	4	0	16
	29	擦痕	20	56	36	36	24
	30	撞击深坑	4	8	20	8	32
	31	高起伏	64	78	52	48	72
	32	棱脊磨损	0	0	0	0	0
	33	尖棱脊	24	12	16	12	20
	34	多棱角	4	8	12	8	4
	35	尖棱角	12	12	0	8	20
	36	台阶	8	0	0	0	0
	37	平行解理面	0	0	0	0	0
38	中贝壳状断口	0	12	0	4	0	
39	大贝壳状断口	0	4	4	8	20	

表 2 牧马场剖面 ESR 测年结果  
Table 2 ESR dating results of the Mumachang profile

样品编号	采样点距底部高度/m	年剂量 Dy/(Gy·ka <sup>-1</sup> )	累积剂量 TD/(Gy)	年龄 /ka BP
BP01	1.7	3.309	802.8	242.6±24
BP03	6.7	3.400	766.6	225.5±20

牧马场剖面所处的位置和沉积物特征, 推测该剖面泥砾堆积物为庐山冰期产物。庐山冰期规模远小于鄱阳冰期和大姑冰期, 其发育的冰碛物也未达到山麓(李四光, 1947)。对该剖面的 3 个样品 BP01、BP03、BP05 进行了 ESR 测年, 其中 BP05 样品因

未能制取出足量的石英而无法得出其年代。BP01 和 BP03 年代分别为(242.6±24) ka BP 和(225.5±20) ka BP(表 2), 属于中更新世晚期庐山冰期产物, 与推测的年代基本一致。

### 3 庐山地区第四纪冰川发育条件

冰期和间冰期的交替是第四纪气候的主要特征, 是第四纪气候的主要波动形式(刘嘉麒等, 2001)。庐山所处的长江中下游地区位于青藏高原以东, 第四纪期间气候变化受青藏高原隆升影响显著。研究庐山地区第四纪气候与环境, 必须考虑到

青藏高原第四纪期间强烈隆升带来的影响。而第四纪全球大冰期的到来,更是与 2.6 Ma 以来青藏高原持续隆升关系密切(An et al., 2001)。青藏高原在第四纪期间的持续隆升对大气环流的影响显著,主要表现在东亚地区夏季风减弱,冬季风增强(An et al., 2001)。青藏高原的持续隆起,阻挡了来自印度洋的暖湿气流,加剧了亚洲内陆干旱化,在冬季风环流影响下使大气粉尘载荷增加,促进了冰期气候的发展(An et al., 2001)。同时,由于青藏高原隆起的影响,来自西伯利亚的冷气流在中国东部地区得到加强,在我国东部地区形成一个“冷槽”(杨怀仁等, 1988),冰期中更容易受到来自西伯利亚和北冰洋的寒流影响,从而有利于冰川发育。

青藏高原主夷平面在早更新世 2.6 Ma 隆升至 2000 m 左右,冬季风开始出现,黄土开始堆积(李吉均, 1999),高原上发育了规模较大的冰川作用,如希夏邦马冰期(赵越等, 2009),杨达源(1989)计算青藏高原在早更新世期间雪线高度 2500~3000 m。青藏高原主夷平面在中更新世隆升至 3000 m 左右,在此期间青藏高原发育了第四纪最大规模的冰川作用-聂聂雄拉冰期(李吉均等, 1979)。随着青藏高原的持续隆起,来自印度洋的暖湿气流受到阻挡而逐渐减少,青藏高原及西北内陆地区气候趋向干冷。如果考虑到青藏高原的高原加热作用(叶笃正等, 1974),纬度相近的长江流域雪线高度应该低于青藏高原上的雪线高度。此外,冰期中我国东部地区夏季风减弱,但仍保持一定的降水量,也有利于冰川发育(杨怀仁等, 1988)。在地形地貌上,庐山、黄山和天目山等类似,周围地形相对平坦,有利于垂直气流的发展和降水量增加,实际上这也正是庐山多雾的原因之一,在冰期中,这也有利于冰川的发展。

庐山在第四纪期间发育的冰川类型为海洋型冰川(徐馨等, 1999),与青藏高原东南部发育的冰川类型相似。在冰期中,雪线高度自西向东逐渐降低,主要是因为东部地区降水量增加,有利于冰川发育。由老到新,冰川规模逐渐降低,这也反映在不同冰期形成的冰川地貌和堆积物分布的海拔高度上。到末次冰期(大理冰期),中国东部地区气候条件已不利于冰川发育,包括庐山在内的长江中下游地区中低山地均未发育冰川作用。

#### 4 结论与讨论

通过石英砂电镜扫描和成因分析以及 ESR 测年,确认了庐山牧马场剖面在中更新世晚期具有冰川作用的痕迹。石英砂电镜扫描和成因分析是分析沉积环境和沉积相的一种重要方法,但也存在一定的不足,例如某些泥石流堆积物和冰川堆积物的形

貌特征具有相似性,怎样更准确地区分仍有待继续研究。ESR 年代测试中,石英砂 ESR 信号在冰期环境中能否完全“回零”,对测年结果的准确度也会有一定影响,但是在中更新世甚至更老的冰碛物测年中,ESR 测年仍然是可行的。

在寻找庐山第四纪冰川证据的过程中,研究者们不断尝试新的研究方法,如声发射应力测量(赵志中等, 2000)和显微构造的力学分析(胡东生等, 2009)等。随着测试技术和研究方法的不断发展,以及第四纪地质和第四纪冰川学理论的不完善和成熟,我们期待能够早日揭开庐山冰川的真面目。

致谢:野外工作中得到庐山国土资源局田娇荣局长、宋江宁主任和熊卫强科长等大力支持,石英砂电镜扫描(SEM)在中国地质大学(武汉)扫描电镜室由严春杰教授协助完成,电子自旋共振(ESR)测年在成都理工大学由梁兴中教授协助测定,测试费用由庐山国土资源局资助,谨致谢忱。

#### 参考文献:

- 陈丽华, 缪昕, 于众. 1986. 扫描电镜在地质上的应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 何培元, 段万侗, 刑历生, 刘兰锁. 1992. 庐山第四纪冰期与环境[M]. 北京: 地震出版社.
- 胡东生, 张华京, 徐冰, 白建斌, 田新洪, 王旭龙, 宋友桂, 于学锋, 刘卫国, 安芷生, 张国伟. 2009. 中国庐山第四纪沉积砾石的显微构造系统及地质环境动力学分析[J]. 地球学报, 30(6): 787-795.
- 李吉均, 文世宣, 张青松, 王富葆, 郑本兴, 李炳元. 1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式探讨[J]. 中国科学, (6): 608-616.
- 李吉均. 1999. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 1-11.
- 李四光. 1947. 冰期之庐山[J]. 前中央研究院地质研究所专刊, 乙种第二号: 1-60.
- 林敏, 尹功明, 丁艳秋, 崔莹, 陈克胜. 2005. 碎屑沉积物中石英低温 Al 心的 ESR 测年初探[J]. 地球学报, 26(S1): 255-257.
- 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, 21(3): 239-248.
- 施雅风, 崔之久, 李吉均. 1989. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社.
- 施雅风, 赵井东, 王杰. 2011. 中国第四纪冰川新论[M]. 上海: 上海科学普及出版社.
- 王令占, 涂兵, 田洋, 谢国刚, 曾波夫. 2012. 鄂西清江中上游高海拔砾石层 ESR 定年及地质意义[J]. 地球学报, 33(3): 316-322.
- 吴锡浩, 蒋复初, 徐和聆, 肖华国. 1997. 北京潭柘寺地区第四纪冰川遗迹的宏观和微观特征[J]. 地质力学学报, 3(4): 3-12.
- 谢又予, 崔之久. 1981. 电子扫描镜下我国若干冰碛石英砂的表

面特征[J]. 冰川冻土, 3(2): 52-55.

- 徐馨, 沈志达, 何才华. 1999. 对长江中下游第四纪冰川发育的新认识[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 17(1): 1-6.
- 杨达源. 1989. 关于中国东部第四纪冰期环境和“冷槽”问题[J]. 地理科学, 9(4): 306-310.
- 杨怀仁, 徐馨. 1980. 中国东部第四纪自然环境的演变[J]. 南京大学学报(自然科学版), (1): 121-144.
- 叶笃正, 张捷迁. 1974. 青藏高原加热作用对夏季东亚大气环流影响的初步模拟实验[J]. 中国科学, (3): 301-320.
- 尹功明, 林敏. 2005. 现代沉积物石英 E' 心的 ESR 测量[J]. 地球学报, 26(S1): 252-254.
- 张兰庭. 1984. 庐山地区第四纪地层的研究[J]. 第四纪冰川与第四纪地质论文集(第一集). 北京: 地质出版社: 86-97.
- 张仲培, 王清晨, 王毅. 2007. 库车坳陷克依构造带坎亚背斜变形序列及其 ESR 年代[J]. 地球学报, 28(1): 23-31.
- 赵越, 钱方, 朱大岗, 张永双, 邵兆刚, 何哲峰. 2009. 青藏高原第四纪冰川的早期记录及其构造与气候含义[J]. 中国地质, 36(6): 1195-1207.
- 赵志中, 陈安东, 王敏, 钱方, 何培元. 2012. 庐山第四纪冰期与环境[C]//庐山地质公园的地质遗迹研究. 北京: 地质出版社: 98-102.
- 赵志中, 丁原辰, 钱方, 何培元, 邵兆刚. 2000. 冰川沉积物成因确定的一种新方法[J]. 地球学报, 21(4): 396-400.
- 中国科学院计算机网络信息中心. 2012. 国际科学数据服务平台[EB/OL]. [2012-5-18]. <http://datamirror.csdb.cn.htm>.
- 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 韩建恩, 余佳, 孟庆伟, 吕荣平. 2006. 山西宁武地区高山湖泊全新世湖相地层划分及干海组的建立[J]. 地质通报, 25(11): 1303-1310.
- 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 杨朝斌, 韩建恩, 余佳, 杜建军, 孟庆伟. 2005. 西藏阿伊拉日居山南麓第四纪冰川沉积物及其 ESR 年龄测定[J]. 冰川冻土, 27(2): 194-198.

## References:

- AN Zhi-sheng, JOHN E K, WARREN L P, STEPHEN C P. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 411: 62-66.
- CHEN Li-hua, MIU Xin, YU Zhong. 1986. Scanning electron microscopy and its application on geology [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. 2012. International Scientific Data Service Platform [EB/OL]. [2012-5-18]. <http://datamirror.csdb.cn.htm>(in Chinese).
- EHLERS J, GIBBARD P L. 2007. The extent and chronology of Cenozoic Global Glaciation[J]. Quaternary International, 164-165: 6-20.
- GRANGER D E, MUZIKAR P F. 2001. Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 188: 269-281.
- HE Pei-yuan, DUAN Wan-ti, XING Li-sheng, LIU Lan-suo. 1992.

- Quaternary glaciation and environment in Lushan mountain, Jiangxi, China [M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- HU Dong-sheng, ZHANG Hua-jing, XU Bing, BAI Jian-bin, TIAN Xin-hong, WANG Xu-long, SONG You-gui, YU Xue-feng, LIU Wei-guo, AN Zhi-sheng, ZHANG Guo-wei. A dynamic analysis of the geological environment and micro-structural system of the quaternary sedimentary gravels in the Lushan area of China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(6): 787-795(in Chinese with English abstract).
- LEE J.S. 1934. Quaternary glaciation in the Yangtze valley [J]. Bulletin of the Geological society of China, 13(1): 15-62.
- LI Ji-jun, WEN Shi-xuan, ZHANG Qing-song, WANG Fu-bao, ZHENG Ben-xing, LI Bing-yuan. 1979. On the timing, scope and styles of the uplift of the Tibetan Plateau [J]. Science in China, (6): 608-616 (in Chinese).
- LI Ji-jun. 1999. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. Marine geology & Quaternary geology, 19(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- LI Si-guang. 1947. Quaternary glaciations in the Lushan area, central China [J]. Memoirs of the Institute of Geology, Academia Sinica, B2: 1-70.
- LIN Min, YIN Gong-ming, DING Yan-qiu, CUI Ying, CHEN Ke-sheng. 2005. A preliminary study of ESR dating for aluminum center in quartz from sediments[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(S1): 255-257(in Chinese with English abstract).
- LIU Jia-qi, NI Yun-yan, CHU Guo-qiang. 2001. Main palaeoclimatic events in the Quaternary [J]. Quaternary science, 21(3): 239-248(in Chinese with English abstract).
- SHI Ya-feng, CUI Zhi-jiu, LI Ji-jun. 1989. Problems on Quaternary Glaciations and Environment in Eastern China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- SHI Ya-feng, ZHAO Jing-dong, WANG Jie. 2011. New understanding of Quaternary glaciations in China[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press(in Chinese).
- WANG Ling-zhan, TU Bing, TIAN Yang, XIE Guo-gang, ZENG Bo-fu. ESR dating of the high elevation gravels in the upper and middle reaches of the Qingjiang River and its significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 316-322(in Chinese with English abstract).
- WU Xi-hao, JIANG Fu-chu, XU He-ling, XIAO Hua-guo. 1997. Macroscopic and microscopic features of the Quaternary glacial vestiges in the Tanzhesi area of the Western Hills of Beijing[J]. Journal of Geomechanics, 3(4): 3-12(in Chinese with English abstract).
- XIE You-yu, CUI Zhi-jiu. 1981. Some surfacial characteristics of till quartz sand in China under electronic scanning[J]. Journal of glaciology and geocryology, 3(2): 52-55(in Chinese with English abstract).
- XU Xin, SHEN Zhi-da, HE Cai-hua. 1999. A new idea to Quaternary glaciation in the Middle-lower reaches of the Changjiang River[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sci-

- ence), 17(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- YANG Da-yuan. 1989. On the environment and the "cold trough" during the quaternary ice age in East China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 9(4): 306-310(in Chinese with English abstract).
- YANG Huai-ren, XU Xin. 1980. Quaternary environmental changes in eastern China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, (1): 121-144(in Chinese with English abstract).
- YEH T C, CHANG C C. 1974. A preliminary experimental simulation on the heating effect of the Tibetan Plateau on the central circulation over eastern Asia in summer[J]. *Scientia Sinica*, 17(3): 397-420.
- YIN Gong-ming, LIN Min. 2005. ESR Dating of Modern Sediment Samples with Quartz E' Center[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(S1): 252-254(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lan-ting. 1984. Research of Quaternary strata on Mt. Lushan [J]. *Proceedings of Quaternary glaciology and geology I*. Beijing: Geological Publishing House: 86-97(in Chinese).
- ZHANG Zhong-pei, WANG Qing-chen, WANG Yi. 2007. Progressive Structural Deformation and ESR Dating Ages of Kan-yaken Anticline in Kelasu-Yiqikelike Structural Belt of the Kuqa Depression[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(1): 23-31 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yue, Qian Fang, ZHU Da-gang, ZHANG Yong-shuang, SHAO Zhao-gang, HE Zhe-feng. 2009. Early records of Quaternary glaciation in Qinghai-Tibet plateau and their tectonic and climatic implications[J]. *Geology in China*, 36(6): 1195-1207(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi-zhong, CHEN An-dong, WANG Min, QIAN Fang, HE Pei-yuan. 2012. Quaternary glaciation and environment in Mt. Lushan[C]//*Geological Heritages Study on Lushan Geopark, China*. Beijing: Geological Publishing House: 98-102(in Chinese).
- ZHAO Zhi-zhong, DING Yuan-chen, QIAN Fang, HE Pei-yuan, SHAO Zhao-gang. A new method for identifying moraine[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 21(4): 396-400(in Chinese with English abstract).
- ZHU Da-gang, MENG Xian-gang, SHAO Zhao-gang, HAN Jian-en, YU Jia, MENG Qing-wei, LÜ Rong-ping. 2006. Holocene lacustrine deposits in mountain lakes in Ningwu, Shanxi, China and establishment of the Ganhai formation[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1303-1310(in Chinese with English abstract).
- ZHU Da-gang, MENG Xian-gang, SHAO Zhao-gang, YANG Chao-bin, HAN Jian-en, YU Jia, MENG Guo-wei. 2005. Quaternary glacial deposits and their ESR dating results on the south slopes of the Ayilariju Mountains, Tibet Autonomous region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(2): 194-198(in Chinese with English abstract).

## 图版说明

### 图版 I Plate I

- A-BP02 无定形硅沉淀和硅质薄膜;  
 B-BP03 石英颗粒表面的硅质鳞片;  
 C-BP05 机械 V 形坑和鳞片状剥落;  
 D-BP01 石英颗粒表面的翻卷解理薄片;  
 E-BP02 石英表面小撞击坑和机械 V 形坑;  
 F-BP01 样品石英颗粒表面擦痕;  
 G-BP02 样品贝壳状断口、粘附扁平碎片;  
 H-BP04 SiO<sub>2</sub> 碎片粘附在石英颗粒表面
- A-silica precipitates and siliceous film on quartz grain of BP02;  
 B-siliceous flakes on quartz grain of BP03;  
 C-V-shaped percussion cracks flakes shell on quartz grain of BP05;  
 D-curved slices on quartz grain of BP01;  
 E-small craters and V-shaped percussion cracks on quartz grain of BP02;  
 F-scratches on quartz grain of BP01;  
 G-conchoidal fractures and fragment adhered on quartz grain of BP02;  
 H-SiO<sub>2</sub> fragment adhered on quartz grain of BP04

图版 I Plate I

