

黄山北麓青弋江发育研究

胡春生^{1,2}, 刘邵晨^{1,2}, 胡晨琦^{1,2}, 曹 乐^{1,2}, 周迎秋^{1,2}

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241002;

2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 青弋江位于黄山北麓, 为长江下游最长的支流。野外考察发现青弋江泾县盆地存在溪口剖面 and 城北剖面等2个天然剖面, 共发育了1级洪积扇台地(P)和3级河流阶地(T3、T2和T1), 并相应堆积了4级砾石层。通过对砾石层进行砾组分析, 并借助电子自旋共振(ESR)测年和古地磁测年等方法, 初步探讨了青弋江发育的年代、过程和成因。研究结论为: ① 砾组分析表明青弋江T3阶地是青弋江的最老阶地, 并且其砾石层是青弋江的最老砾石层; ② 测年结果表明青弋江发育的年代区间为1300~900 ka, 其中~1300 ka为青弋江发育的最早年代, 而~900 ka则为青弋江发育的最晚年代; ③ 青弋江发育于~1377 ka前的洪积扇辫状河, 并先后经历了洪积扇及辫状河发育、辫状河下切、青弋江形成等阶段, 即所谓的源于洪积扇辫状河的青弋江发育过程; ④ 青弋江发育可能是降水增加和构造抬升共同作用的结果。该研究有助于为中国东部地区中小河流发育研究提供参考。

关键词: 青弋江; 河流阶地; 砾石层; 砾组分析; 年代; 河流发育

DOI: 10.11821/dlxb201801012

1 引言

河流地貌及河流沉积物是研究河流演化历史的重要信息载体。其中, 河流阶地作为河流地貌最重要的组成部分, 因其是河流曾经古河道的所在地, 是揭示河流发育历史最直接的地貌证据^[1-2], 并且流域内最老阶地的年代指示着河流的最晚发育年代^[3-4]。而河流沉积物, 特别是砾石层, 通过分析其沉积环境, 同样能反映河流发育过程, 而且流域内最老河流相砾石层的堆积年代基本反映了河流的最早发育时代。因此在河流发育史的研究中, 河流阶地和冲积砾石层的研究成为广泛瞩目的关键。例如基于最老阶地的研究, 重建了黄河及其支流水系^[1, 5-10]以及长江的发育史^[11-15]; 在黄河^[3, 16]、长江^[17-25]以及黑河^[26-27]等河流的发育演化研究中, 广泛应用了河流沉积物(砾石层)的分析方法。

值得一提的是, 不论是运用河流阶地还是运用河流沉积物来研究河流发育, 都需要准确的年代控制, 因此在河流发育研究中测年工作显得尤为重要。当前, 对于年代久远的河流阶地或沉积物, 电子自旋共振(ESR)测年和古地磁测年是行之有效的测年方法, 并得到了广泛的应用^[3, 28-35]。此外, 在进行河流砾石层研究时, 常运用砾组分析法(砾径、砾向、砾态和砾性等方面)来定量研究砾石层的沉积环境, 该方法有助于揭示和重建砾石层形成时的动力条件、搬运过程、岩性成分以及物质来源等信息^[36-40], 进而为判别砾石层的归属以及河流发育研究提供参考。

青弋江是长江下游地区最长的一级支流, 发源于黄山山脉, 是研究中国东部地区中

收稿日期: 2017-06-20; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301011) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301011]

作者简介: 胡春生(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事河流地貌研究。E-mail: huchsh03@mail.ahnu.edu.cn

小河流发育的理想案例。并且沿青弋江中上游两岸分布着多级河流阶地和砾石层^[4, 40-42], 为该区河流发育研究提供了良好的地貌学和沉积学证据。本研究旨在通过砾组分析法判定砾石层的沉积环境, 并借助ESR测年和古地磁测年等方法, 测定青弋江最老河流阶地和最老河流相砾石层的年代, 最后对青弋江发育的年代、过程及原因进行了初步探讨。

2 研究区及研究剖面

黄山山脉地处中国华东地区, 主体位于安徽省黄山市境内。山脉主体呈北东走向, 南北长约40 km、东西宽约30 km^[43], 是长江水系和钱塘江水系的区域分水岭。黄山北麓地区发育了多条河流, 如青弋江和水阳江等, 属于长江下游水系的重要组成部分。其中, 青弋江是长江下游地区最长的一级支流, 全长309 km, 流域面积达7195 km²^[4] (图1a)。青弋江流域属中亚热带季风气候, 年均气温为16℃, 年均降水量为1500 mm, 为青弋江及其支流提供了稳定的降水补给。

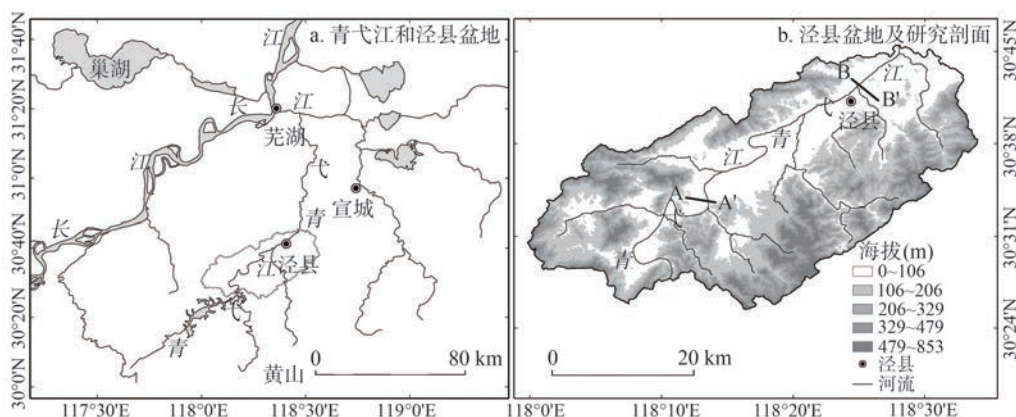


图1 研究区概况: 青弋江和泾县盆地及研究剖面(AA'为溪口剖面, BB'为城北剖面)

Fig. 1 Sketch map of the study area. (a) The Qingyijiang River and the Jingxian Basin; (b) The Jingxian Basin and the cross sections: AA' denotes Xikou cross section; BB' denotes Chengbei cross sections

青弋江流域构造上属于江南古陆北部骨干的皖南突起, 其北侧是宁芜洼陷^[44], 因而造就了河流自南而北的基本流向。其中, 青弋江泾县盆地地段位于青弋江上游地区, 既是山区峡谷与河谷平原的交汇处, 又是皖南山区和沿江平原的过渡地带, 该区河流地貌比较发育, 是研究河流发育的关键河段 (图1)。经野外考察, 泾县盆地存在溪口和城北等2个天然研究剖面, 共发育了1级洪积扇台地 (*P*)、3级河流阶地 (*T*₃、*T*₂、*T*₁), 以及4级砾石层 (表1), 并且沿河两岸一般发育狭窄的河漫滩 (*T*₀) (图1b, 图2)。其中, *SJ-T*₃阶地、*TY-T*₂阶地和*XG-T*₁阶地都发育了较厚的砂层, 该砂层具有水平层理结构, 并且自下而上粒径总体变细、粘粒含量增多。此外, *P*台地、*T*₃阶地和*T*₂阶地之上均堆积了厚度不等的网纹红土 (图2, 表1)。

3 研究方法

3.1 砾组分析法

砾组分析是定量研究砾石层沉积环境的有效途径之一。由于前期已经对溪口剖面砾石层进行了砾组分析^[40], 所以这里仅对城北剖面的*GT-P*台地、*CB-T*₃阶地和*TY-T*₂阶地

表1 泾县盆地洪积扇台地和河流阶地的基本特征

Tab. 1 Characteristics of the diluvial platform and fluvial terraces in the Jingxian Basin

台地/阶地	类型	拔河高度(m)	砾石层厚度(m)	砂层厚度(m)	上覆物厚度(m)	上覆堆积物
GT-P	洪积扇台地	65	>10	0	7.5	强网纹红土
SJ-T3	基座阶地	38	5	1.8	>3	弱网纹红土
CB-T3	基座阶地	39	4.5	0	10.9	强网纹红土
CA-T2	堆积阶地	18	>2.8	>0.3	>2.8	弱网纹红土
TY-T2	堆积阶地	21	>2	2.2	>3	弱网纹红土

等砾石层进行分析。在野外，将上述3个砾石层剖面均分成上下两层位，分别命名为1层位和2层位。针对每个层位，采用网格法选择10 cm×10 cm的区域，对每个网格内的砾石进行砾径、砾态和砾性等参数的测量与计算，并且要求每个层位统计砾石不少于100颗。

其中，砾径计算首先测量每颗砾石的长轴（*a*轴）、中轴（*b*轴）和短轴（*c*轴）的长度 d_a 、 d_b 和 d_c ，然后再计算砾石粒径 d ，其计算公式为 $d=\sqrt[3]{d_a d_b d_c}$ ^[37-38]。砾态分析则按照棱状、次棱状、次圆状、圆状和极圆状对砾石进行分类^[45-46]。并且，在进行砾径测量和砾态分析的同时，野外同步进行砾石岩性的鉴定。

3.1 ESR 测年

主要采用了ESR测年法测定河流阶地和砾石层的年龄，野外共采集了9个ESR样品（图2）。其中，GT-P001和GT-P002分别采自GT-P台地网纹红土底部和砾石层上部，CB-T3001、CB-T3002和CB-T3003分别采自CB-T3阶地网纹红土下部和底部、以及砾石层底部，而SJ-T3001、SJ-T3002、SJ-T3003和SJ-T3004分别采自SJ-T3阶地网纹红土底部、砂层下部和上部（图2）。采样时，首先自剖面表层向内开挖30~50 cm，在遮光条件下将直径5 cm、长20 cm的钢管一端用黑色遮光袋密封，另一端用锤子水平打入剖面中；然后将钢管整体取出，将另一端也用黑色遮光袋密封，并依次用锡纸、黑色遮光袋和胶带将整个钢管包裹密封。

ESR测年实验在中国原子能科学研究院放射计量学中心完成，测试仪器为德国Bruker公司生产的EXM型ESR谱仪。在实验室中，首先每个钢管中间部分的样品经过低温干燥和物理研磨筛分，用化学分离技术提取石英颗粒。再依次用H₂O₂去除有机质，稀HCL去除碳酸盐，HF处理蚀刻、去除长石等，然后低温烘干获得石英颗粒。再用磁性分离器去除磁性矿物。最后，将每个样品分成等量的10份，分别接受来自⁶⁰Co源不同人工剂量的辐照，范围在0~8000 Gy之间。经过人工辐照后的样品在低温下运用Ti-Li测年信号对样品进行测量。样品所受的天然辐照剂量即古剂量通

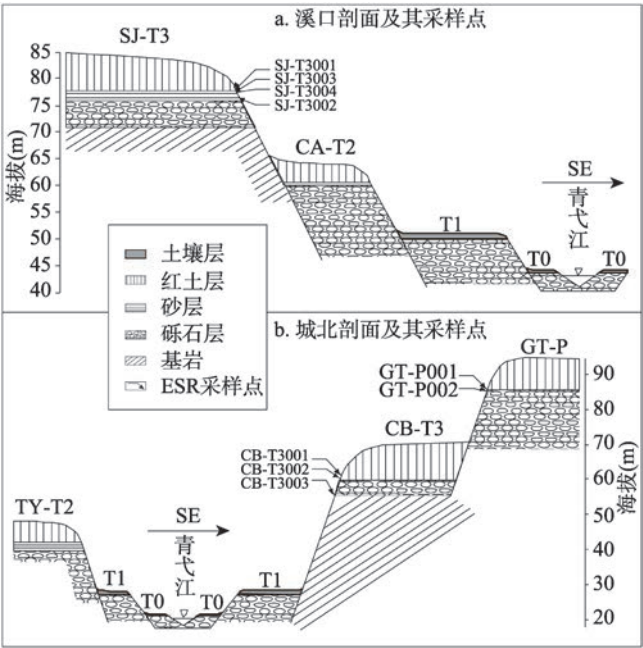


图2 研究剖面 and ESR 样品采样点
Fig. 2 Cross sections and the ESR sampling points

过人工额外辐照和指数拟合法获得,样品的年剂量通过计算每个样品中U、Th、K等微量元素、样品的含水量及颗粒大小等获得。

3.2 古地磁测年

除采用ESR测年外,对CB-T3阶地上覆网纹红土进行了古地磁测年研究,野外共采集了正北定向古地磁样品29块。采样时,首先在红土层中修理出一个水平台面,然后用罗盘在其上直接标识出正北方向,最后取下块状样品,并用塑料袋和胶带包裹,以免样品破裂。在采样过程中,为了准确捕捉到古地磁极性倒转界面,采用了等间距和不等间距两种方法,在剖面下部采取0.2 m等间距密集采样,而在剖面上部采取0.5~1 m不等间距采样。在古地磁测量前,每个块状样品在实验室中被加工成2 cm×2 cm×2 cm立方体标准样3块,得到3套87块古地磁标准样,其中2套用于测试、1套备用。

古地磁测量实验在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,测试仪器为美国ASC公司生产的TD-48热退磁仪和美国2G公司生产的2G-755超导磁力仪。在零磁场实验室中,在用2G-755超导磁力仪测量标准品的天然剩磁(NRM)后,对全部标准样在TD-48热退磁仪上依次进行系统退磁,退磁档次分别为100℃、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、450℃、500℃、550℃、580℃、610℃、630℃、650℃和680℃,共15步。并且在每步退磁后,均用2G-755超导磁力仪测量标准样的磁场方向和磁场强度。

4 结果与分析

4.1 砾组分析结果与分析

就城北剖面的平均砾径而言, CB-T3阶地砾石层达到4.82 cm, TY-T2阶地砾石层为4.37 cm, 而GT-P台地砾石层为3.95 cm。除GT-P台地砾石层外,最大砾径、平均a轴、最大a轴等都是CB-T3阶地砾石层大于TY-T2阶地砾石层, 分别为16.13 cm、9.03 cm和21 cm(表2)。此外, CB-T3阶地砾石层砾径以3~9 cm

表2 泾县盆地城北剖面砾石层的砾径分析结果
Tab. 2 Gravel diameters of the gravel beds at Chengbei cross section in the Jingxian Basin

层位	平均砾径 (cm)	最大砾径 (cm)	平均a轴 (cm)	最大a轴 (cm)
TY-T2-1	4.05	9.99	6.77	15
TY-T2-2	4.68	11.48	7.15	18
CB-T3-1	3.61	8.77	6.09	12.5
CB-T3-2	6.02	16.13	9.03	21
GT-P-1	3.97	11.09	6.18	17
GT-P-2	3.92	13.45	6.53	20

的中粗粒为主,并且砾径分布分散、粗大砾石比重大, TY-T2阶地砾石层砾径以3~6 cm的中粒为主,砾径分布比较集中,而GT-P台地砾石层以3~7 cm的中粒为主,但砾径分布同样比较分散,含有较多粗大砾石(图3)。砾径分析表明,上述3级砾石层堆积时均具有较强的水动力,其中CB-T3阶地砾石层堆积时水动力最强且最不稳定,而GT-P台地砾石层堆积时水动力比较弱、但并不稳定,会伴有偶发性的高流速或高流量水流,只有TY-T2阶地砾石层堆积时水动力较强并最稳定。

就城北剖面的砾态而言, GT-P台地砾石层以次棱状和次圆状为主,两者总含量超过75%,并且次棱状砾石最多,达到36.82%,而CB-T3阶地砾石层和TY-T2阶地砾石层均以次圆状和圆状为主,总含量均达到72%以上,但TY-T2阶地砾石层极圆状更多,达到11.60%(表3)。砾态分析表明,自GT-P台地砾石层至TY-T2阶地砾石层砾石磨圆度逐渐变好;其中, GT-P台地砾石层磨圆度最差,反映其砾石的搬运距离较近且打磨程度不高,应以近源搬运物质为主,而TY-T2阶地砾石层砾石磨圆度最高,其砾石应该经历了

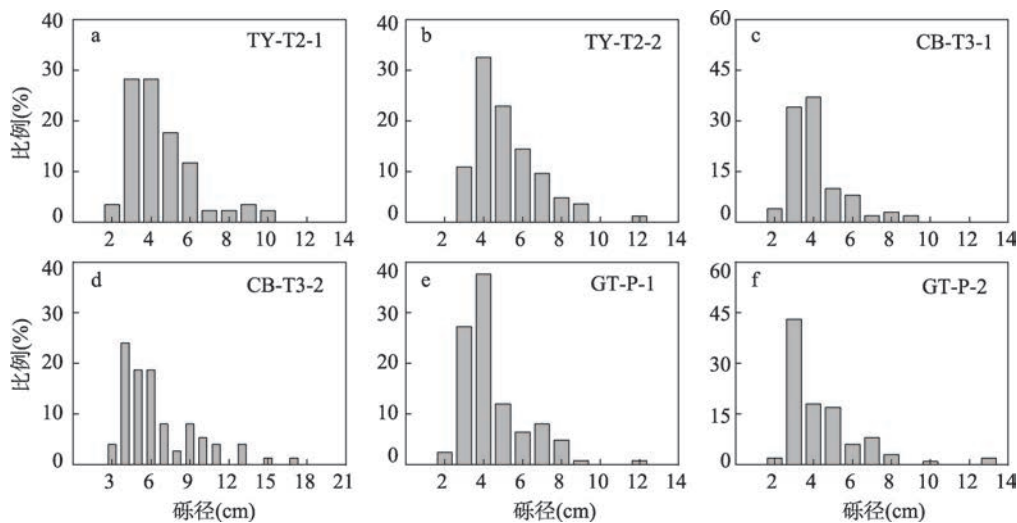


图3 泾县盆地城北剖面砾石层中不同砾径比例
Fig. 3 Gravel diameter proportions of the gravel beds at Chengbei cross section in the Jingxian Basin

较长距离的搬运和打磨，以远源搬运物质为主；但值得注意的是，CB-T3阶地砾石层中次棱状砾石含量也较高，反映其砾石层中可能存在较多的近源搬运物质，并且其沉积环境可能较TY-T2阶地砾石层复杂，而与GT-P台地砾石层有一定的相似性。

表3 泾县盆地城北剖面砾石层的砾态分析结果				
Tab. 3 Gravel shapes of the gravel beds at Chengbei cross section in the Jingxian Basin				
台地/阶地	次棱状(%)	次圆状(%)	圆状(%)	极圆状(%)
TY-T2	13.81	39.78	34.81	11.60
CB-T3	22.29	38.86	33.14	5.71
GT-P	36.82	39.55	21.82	1.82

就城北剖面的砾性而言，各级砾石层主要组分为砂岩和石英砂岩，两者总含量均超过77%，但较低的TY-T2阶地砾石层却含有一定的花岗岩组分，为0.55%（表4）。砾性分析表明，虽然自GT-P台地砾石层到TY-T2阶地砾石层均以砂岩为最多组分，但在CB-T3阶地砾石层堆积前后，砾石成分发生了较为显著的变化，并导致了硅质岩和花岗岩组分的增加、以及砂岩组分的减少和石英砂岩组分的增加，反映出在此期间砾石层的物源区可能发生了一定程度的改变。

表4 泾县盆地城北剖面砾石层的砾性分析结果						
Tab. 4 Gravel lithologies of the gravel beds at Chengbei cross section in the Jingxian Basin						
台地/阶地	脉石英(%)	石英砂岩(%)	砂岩(%)	石英岩(%)	硅质岩(%)	花岗岩(%)
TY-T2	5.52	38.67	38.67	13.26	3.31	0.55
CB-T3	5.71	24.57	59.43	9.14	1.14	0
GT-P	4.12	32.35	48.24	14.12	1.18	0

4.2 ESR测年结果与分析

ESR测年数据显示，GT-P台地上覆网纹红土的底部年龄约为772.9 ka，GT-P台地砾石层上部的年龄约为1377 ka（表5）。那么，GT-P台地砾石层应堆积于1377 ka前，属早更新世晚期沉积物，但由于该年龄是砾石层顶以下0.5 m处（深度8 m处）的年龄，所以GT-P台地的年代应该晚于1377 ka，而早于网纹红土的堆积年龄772.9 ka。

CB-T3阶地上覆网纹红土的下部和底部年龄分别约为839.9 ka和884.3 ka，两者刚好

可以相互验证,同时CB-T3阶地砾石层底部的年龄约为1318 ka(表5)。那么,CB-T3阶地砾石层开始堆积于1318 ka前,并且CB-T3阶地的年代应早于884.3 ka、而晚于砾石层堆积年代1318 ka。并且,该阶地表面上于884.3 ka前开始稳定堆积网纹红土,略早于上述GT-P台地上网纹红土的堆积年代。

SJ-T3阶地上覆网纹红土的底部年龄约为390.7 ka,而砂层底部的年龄为905.4 ka前后(表5)。但砂层上部先后所采两个ESR样品的年龄差距很大,分别为361.4 ka和949.3 ka(表5)。由于该阶地上覆红土为弱网纹红土,所以阶地年代应早于弱网纹红土的堆积年代,再结合所测的砂层底部年龄,因此认为SJ-T3003的ESR年龄不可信,而应采用SJ-T3004的年龄。同时,虽然SJ-T3002和SJ-T3003的年龄存在倒挂现象,但两者相差不大,因此综合得出SJ-T3阶地砾石层应形成于949.3 ka或905.4 ka前,而SJ-T3阶地形成于949.3~905.4 ka间,此后直到约390.7 ka阶地表面上才开始稳定堆积弱网纹红土。

表5 泾县盆地ESR样品的测年结果
Tab. 5 Dating results of the ESR samples in the Jingxian Basin

样品编号	采样深度(m)	测年物质	辐射剂量(Gy)	年剂量(Gy/ka)	ESR 年龄(ka)
GT-P001	7.5	红土	2794±860	3.61	772.9±238
GT-P002	8.0	砂	5008±1129	3.64	1377±310
CB-T3001	9.4	红土	3114±322	3.71	839.9±86.8
CB-T3002	10.9	红土	3162±983	3.58	884.3±274.9
CB-T3003	15.4	砂	4523±2323	3.43	1318±677
SJ-T3001	3.0	红土	1552±283	3.97	390.7±71.2
SJ-T3002	4.8	砂	4008±1230	4.52	905.4±272.4
SJ-T3003	3.2	粉砂	1580±118	4.37	361.4±27.0
SJ-T3004	3.4	粉砂	3943±1099	4.15	949.3±265

4.3 古地磁测年结果与分析

古地磁测量结果显示,标准样多数具有较强的天然剩磁,并且在退磁实验中呈现比较一致的变化趋势,最终样品的特征剩磁能被很好地分离出来。样品一般在100~200 ℃间剩磁强度和方向都发生了较大的转折,此时表明低温剩磁的有效去除;当退磁温度达到250 ℃以后,样品剩磁方向随温度升高表现出比较稳定的原点趋向,同时剩磁强度缓慢减小;当退磁温度达到500 ℃以后,剩磁强度已经很弱;直至退磁温度达到680 ℃时,剩磁强度几乎为零(图4a),表明这一部分高温剩磁成分应为特征剩磁,代表了红土堆积时原始古磁场的强度和方向。

图4b显示了CB-T3阶地网纹红土古地磁测量结果。该红土剖面包含两个明显极性带,即剖面上部8.4 m表现为正极性,而剖面下部的2.5 m表现为负极性,古地磁极性倒转发生在剖面深度为8.4 m处。通过对比古地磁标准极性柱^[47],深度为8.4 m的极性倒转处为布容—松山界线(即B/M界线)的位置,此处的年代为780 ka(图4b),该研究结果与邻近的宣城红土磁性地层学研究结果基本一致^[48-49]。

关于CB-T3阶地网纹红土底部年龄,可以通过平均堆积速率外推获得。如果根据B/M界线以上红土平均堆积速率进行外推,那么CB-T3阶地红土底部年龄约为1012 ka。如果再根据B/M界线和9.4 m(ESR年龄839.9 ka)之间红土平均堆积速率进行外推,那么CB-T3阶地上覆红土底部年龄约为929.8 ka。由于贾拉米洛极性亚时的年代区间为1070~990 ka^[47],并且并没有在上述剖面中被捕捉到,因此年龄1012 ka显然偏大,而929.8 ka更加可信。

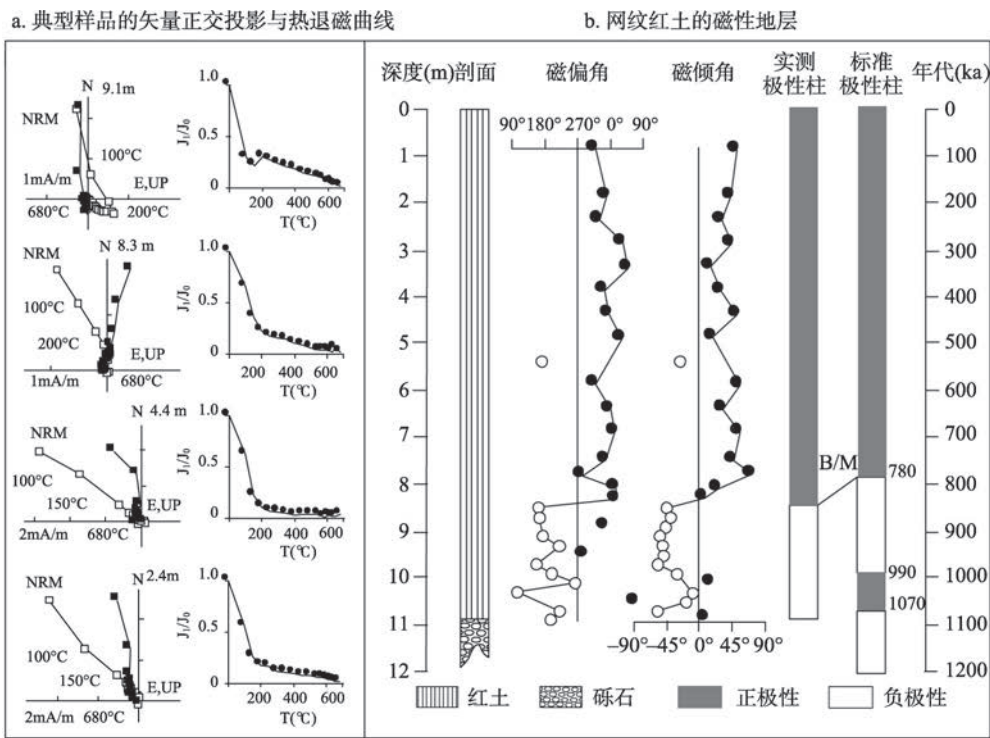


图4 城北剖面CB-T3阶地网纹红土古地磁测量结果

Fig. 4 Paleomagnetic measurement results of the reticulate red clay on CB-T3 terrace section at Chengbei cross section

5 讨论

5.1 最老阶地砾石层堆积前后沉积环境的变化

根据对城北剖面的GT-P台地、CB-T3阶地及TY-T2阶地砾石层的砾组分析结果，并结合前期工作成果^[40]，得出台地砾石层符合洪积扇沉积的基本特征，应属于典型的洪积扇沉积，该分析结论与野外考察结果一致。在该洪积扇砾石层堆积时期，因平时水流小且辐散导致水流搬运能力较弱，所以砾石平均粒径偏小，但偶发性的洪水会搬运粗大砾石，因此不同砾径砾石组成又比较分散，并且含有较多粗大砾石。T2阶地砾石层的砾组分析结果与现代河床砾石层几乎一致，具有典型的阶地沉积物的特征，并且其沉积环境比较稳定，表明该砾石层堆积时期的青弋江已经形成。

需特别指出的是，砾组分析结果显示T3阶地砾石层与T2阶地砾石层更接近，其上部具有典型的河流相沉积特征，再结合野外考察结果，因而得出T3阶地是青弋江发育的最老阶地、T3阶地砾石层是青弋江堆积的最老砾石层。然而，T3阶地砾石层下部所具备的砾径变化大、磨圆度较低、砾性差异大等特征，又与洪积扇台地砾石层有一定的相似性，表明T3阶地砾石层的沉积环境比较复杂，很可能继承了一些洪积扇砾石层的特征。由此可见，T3阶地砾石层堆积前后的青弋江很可能并不完全一致，并且其流域范围在T3阶地砾石层堆积前后也可能发生了一定的改变。因此，合理地讨论青弋江T3阶地砾石层的沉积环境将有助于解开青弋江的发育之谜。

5.2 青弋江发育的年代

通过分析测年结果，得出青弋江P台地砾石层的堆积年代应早于1377 ka（表6），显

然该台地砾石层属早更新世晚期洪积扇堆积物。而 *P* 台地的年代, 即洪积扇停止发育的年代, 应基本同步于导致洪积扇停止发育的河流下切年代; 同时, 在 *P* 台地砾石层之下的 T3 阶地砾石层, 正是由于河流下切并堆积而成, 所以 *P* 台地的年代又与 T3 阶地砾石层堆积年代相当, 因而推断出 *P* 台地的年代应为~1300 ka (表 6); 此后, 直到约 772.9 ka 台地面上才开始稳定堆积强网纹红土 (表 6)。此外, 通过综合分析 CB-T3 阶地和 SJ-T3 阶地的年龄, 得出青弋江 T3 阶地砾石层开始堆积于 1318 ka 前后, 即~1300 ka; CB-T3 阶地上覆网纹红土的堆积年代应为 929.8~884.3 ka; 而 T3 阶地的年代, 即河流下切年代, 应该晚于砂层的年代 949.3~905.4 ka, 而早于上覆网纹红土的堆积年代 929.8~884.3 ka, 因而推断出 T3 阶地的年代应为~900 ka, 此后到约 929.8~884.3 ka 间阶地面上开始稳定堆积强网纹红土 (表 6)。

表 6 泾县盆地洪积扇台地和最老阶地的年代
Tab. 6 Ages of the diluvial platform and the oldest terrace in the Jingxian Basin

台地阶地	类型	拔河高度(m)	台地/阶地年代(ka)	砾石层年代(ka)	网纹红土年代(ka)
P	洪积扇台地	65	~1300	>1377	772.9
T3	基座阶地	38~41	~900	~1300	929.8~884.3

本文讨论青弋江的发育年代, 正是基于上述青弋江最老河流相砾石层与最老阶地的年代。而且, 最老河流相砾石层对应于青弋江最早出现的时代, 而最老阶地则代表了青弋江最晚出现的年代。砾组分析结果已经揭示青弋江最老的河流相砾石层是 T3 阶地砾石层, 最老阶地则为 T3 阶地。同时, 测年结果表明青弋江 T3 阶地相砾石层的堆积年代为~1300 ka, T3 阶地的发育年代为~900 ka。那么, 可以推断出青弋江发育的最早年代应为~1300 ka, 最晚年代应为~900 ka。因此, 黄山北麓青弋江发育的年代区间应为 1300~900 ka, 其中~1300 ka 为青弋江最早发育的年代, 而~900 ka 则为青弋江最晚发育的年代, 它们对应着青弋江的两次显著下切行为。

5.3 青弋江发育的过程

根据砾组分析结果, 青弋江最早河流相砾石层 (T3 阶地砾石层) 沉积环境比较复杂, 其下部可能带有一定的洪积扇沉积特征, 而其上部具有河流沉积特征, 并且在 T3 阶地砾石层形成前后河流本身发生了较大的变化。同时, 已有研究表明在黄山山麓地带曾广泛发育了一套早更新世洪积扇砾石层^[50-54], 并得到了本研究野外考察和砾组分析结果的证实。因此, 基于上述砾组分析与测年结果, 尝试提出以下源于洪积扇辫状河的青弋江发育过程。

首先, 在早更新世晚期 (1377 ka 前), 在黄山北麓山前地带, 由于长期的季节性洪流或泥石流的作用, 于 1377 ka 前后在出山口地带形成了广阔的洪积扇, 并在洪积扇上发育了多条暂时性的辫状河 (图 5a)。此后, 到~1300 ka, 该区环境可能发生了显著变化 (降水增多或地面抬升, 或两者兼有), 其中某一条辫状河开始发生显著下切, 而其他辫状河却逐渐萎缩或消亡 (图 5b)。与此同时, 该辫状河通过加深和拓宽谷地, 逐渐成为稳定的持续性河流而发育成青弋江, 原洪积扇也因青弋江 (或辫状河) 下切而形成 *P* 台地, 而此后青弋江进一步拓宽河谷、堆积 T3 阶地砾石层, 并且发育了较宽广具有二元相结构的河漫滩 (即 T3 阶地面) (图 5c)。最后, 到~900 ka, 该区环境可能再次发生了显著变化, 青弋江再次发生显著下切, 形成了青弋江最老的 T3 阶地, 与此同时谷底开始 T2 阶地砾石层 (图 5d)。因此, 青弋江发育的直接原因正是基于洪积扇之上发生的两次显著下切, 其年代分别对应于~1300 ka 和~900 ka, 标志着青弋江的形成。

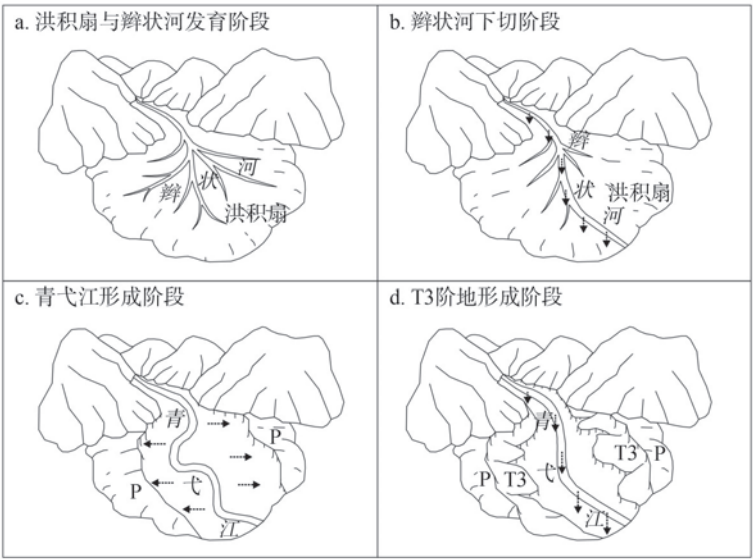


图5 源于洪积扇辫状河的青弋江发育过程

Fig. 5 Development process of the Qingyijiang River from one braided river on the alluvial fan

5.4 青弋江发育的原因

作为记录青弋江发育历史的最老河流相砾石层（T3阶地砾石层）和最老阶地（T3阶地），显然是青弋江（或辫状河）发生两次显著下切的产物，即~1300 ka和~900 ka的两次河流下切，并且这两次下切也标志着青弋江的形成。通常，河流系统因受构造运动、气候变化和侵蚀基准面下降等因素影响而发生显著下切^[55-56]。其中，侵蚀基准面下降主要考虑海平面下降，而并不考虑构造运动引起的侵蚀基准面下降。海平面下降的影响一般仅限于沿海地区^[57]，而泾县盆地距离长江口超过600 km，不大可能受到海平面下降的影响；并且海平面下降的影响仅在狭窄大陆架地区尤为显著，但在宽阔大陆架地区，河流系统通过河道延长足以抵消因海平面下降而引起的坡度变化，因而并不发生显著下切^[58-59]，而东海大陆架恰恰是世界最宽广的大陆架之一，其最宽处约550 km且坡度变化不到1°，因而对海平面下降的影响具有很好的补偿效应。而且，在第四纪时期海平面曾发生过多次显著下降，但青弋江并没有相应发生多次下切。因此，海平面下降应该不是导致青弋江发育的原因。

值得注意的是，在洪积扇台地和最老阶地上均堆积了较厚的网纹红土。研究表明长江中下游地区网纹红土开始堆积于早更新世晚期至中更新世早期^[60]，例如九江铁质和典型网纹红土的堆积时代分别为1232 ka和869 ka^[61]，南京网纹红土开始堆积于1000 ka^[62]，而宣城网纹红土则发育于850 ka^[48-49]；并且网纹红土一般是在降水丰沛且风化作用强盛的环境下形成的^[63-64]。可见，网纹红土开始广泛堆积的现象，代表了长江中下游地区在早更新世晚期至中更新世早期气候转变为湿润期，此时区域降水增加显著。而上述两次显著河流下切的年代均略早于或同步于网纹红土开始堆积时期，表明青弋江发育时可能刚好处于气候转变期，此时降水明显增加。因此，气候转变（降水增加）很可能为青弋江发育提供了气候条件。

此外，青弋江发育的年代也大致同步于一次影响深远的构造运动。在1200~600 ka，青藏高原及周边地区曾发生了一次的剧烈构造运动，称为昆仑—黄河运动^[65-66]，并且该运动很可能影响到长江中下游地区^[44, 67]。例如，九江地区沉积地层中下更新统九江组与中

更新统大姑组之间存在的明显不整合面,代表了早更新世晚期(约1000 ka)九江、庐山地区一次重要的构造抬升运动^[67];而在中更新世初期,长江中下游地区断块及升降运动的规模巨大,且中国南部大陆似乎也普遍存在较大的上升隆起运动^[44]。可见,青弋江发育的年代,与昆仑—黄河运动前期、以及研究区周边地区同期构造运动时代大致相当。事实上,黄山地区在第四纪时期确实发生过多处较大幅度的隆起,每次隆升幅度达70~150 m不等^[68],但青弋江发育是否与这些构造抬升时代完全一致仍不清楚。因此,构造抬升很可能只为青弋江发育提供了构造背景。

综上所述,青弋江发育很可能是气候变化和构造运动综合作用的结果。其中,早更新世晚期至中更新世早期的气候转变(降水增加)为青弋江发育提供了必要气候条件,可能存在~1300 ka和~900 ka两次气候转变,并决定了青弋江发育的年代,而该时期区域较大幅度的构造抬升则可能为青弋江发育提供了必要的构造背景。

6 结论

通过对黄山北麓泾县盆地河流阶地和砾石层的测年研究,以及对砾石层的砾组分析工作,初步讨论了青弋江发育,获得以下初步认识:

(1) 青弋江发育的年代区间为1300~900 ka,其中~1300 ka为青弋江发育的最早年代,而~900 ka为青弋江发育的最晚年代。

(2) 青弋江开始发育于~1300 ka前的洪积扇辫状河,并先后经历了洪积扇与辫状河发育阶段、辫状河下切阶段和青弋江形成阶段,即所谓的源于洪积扇辫状河的青弋江发育过程。

(3) 青弋江发育可能是气候变化和构造运动综合作用的结果,降水增加为青弋江发育提供了气候条件,而构造抬升为青弋江发育提供了构造背景。

本文以青弋江为例,尝试讨论了黄山北麓河流的发育,可能对研究中国东部地区中小河流的发育演化历史有一定的参考价值。但是由于资料所限,文中对青弋江发育原因的讨论稍显不足。同时,作为长江下游最长的一级支流,青弋江发育与长江发育之间是否存在某种程度的联系,还有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Pan B T, Liu X P, Gao H S, et al. Dating and genesis of the upper Weihe River terraces in Longxi basin, China. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(11): 1334-1340.
- [2] Westaway R, Bridgland D R, Sinha R, et al. Fluvial sequences as evidence for landscape and climatic evolution in the Late Cenozoic: A synthesis of data from IGCP 518. *Global and Planetary Change*, 2009, 68: 237-253.
- [3] Pan B T, Wang J P, Gao H S, et al. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 657-664.
- [4] Hu C S, Hu C Q, Liu S C, et al. Dating of the topmost terrace in the Jingxian Basin, Anhui Province: An indication of the establishment of the Qingyijiang River. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(3): 549-557.
- [5] Zhu Zhaoyu. The formation of river terraces and evolution of drainage system in the middle Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(4): 429-440. [朱照宇. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化. *地理学报*, 1989, 44(4): 429-440.]
- [6] Pan Baotian. Development of the Yellow River and uplift of Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1991. [潘保田. 黄河发育与青藏高原隆升问题[D]. 兰州: 兰州大学, 1991.]
- [7] Yang Dayuan, Wu Shengguang, Wang Yunfei. On river terraces of the upper reaches of the Huanghe River and change of the river system. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(2): 137-143. [杨达源, 吴胜光, 王云飞. 黄河上游的阶地与水系变迁. *地理科学*, 1996, 16(2): 137-143.]

- [8] Yue Leping, Lei Xiangyi, Qu Hongjun. The age of terrace development in the middle reaches of the Yellow River. *Geological Review*, 1997, 43(2): 186-192. [岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代. *地质论评*, 1997, 43(2): 186-192.]
- [9] Zhao Cheng, Wang Shimei. Several geological problems of river evolution in Loess Plateau. *Journal of University of Hydraulic & Electric Engineering*, 2000, 22(4): 286-290. [赵诚, 王世梅. 黄土高原河流演化研究中的几个地质问题: 与朱照宇、丁仲礼先生商榷. *武汉水利电力大学学报*, 2000, 22(4): 286-290.]
- [10] Han Jianen, Shao Zhaogang, Zhu Dagang, et al. Characteristics of river terraces and formation of the Yellow River in the source region of Yellow River. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1531-1541. [韩建恩, 邵兆刚, 朱大岗, 等. 黄河源区河流阶地特征及源区黄河的形成. *中国地质*, 2013, 40(5): 1531-1541.]
- [11] Li J J, Xie S Y, Kuang M S. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. *Geomorphology*, 2001, 41: 125-135.
- [12] Yang Dayuan. *Study of the Changjiang River*. Nanjing: Hohai University Press, 2004. [杨达源. *长江研究*. 南京: 河海大学出版社, 2004.]
- [13] Xiang Fang, Zhu Lidong, Wang Chengshan, et al. Terrace age correlation and its significance in research of Yangtze Three Gorges, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2005, 32(2): 162-166. [向芳, 朱利东, 王成善, 等. 长江三峡阶地的年代对比法及其意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(2): 162-166.]
- [14] Xu Qinnian, Yang Dayuan, Ge Zhaoshuai. Run-through along the estuary of the Yalong River-Jinpingzi reach of the Jinsha River. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17(2): 185-199. [胥勤勉, 杨达源, 葛兆帅. 金沙江雅砻江河口—金坪子河段贯通过程. *地质力学学报*, 2011, 17(2): 185-199.]
- [15] Su Huai, Ming Qingzhong, Pan Baotian, et al. The analysis and discussions on the chronological frame of Jinshajiang River Valley-drainage. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(6): 685-692. [苏怀, 明庆忠, 潘保田, 等. 金沙江河谷—水系发育的年代学框架分析与探讨. *山地学报*, 2013, 31(6): 685-692.]
- [16] Liu Yunming, Li Youli, Lu Honghua, et al. Implication of statistical features of terrace pebbles to river evolution from Baode county to Kehu town. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 567-572. [刘运明, 李有利, 吕红华, 等. 从阶地砾石的统计特征看保德至克虎段河流演化. *地理科学*, 2007, 27(4): 567-572.]
- [17] Lin Chengkun. Quaternary ancient Yangtze River and the terrain of sand dune. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 1959(2): 93-106. [林承坤. 第四纪古长江与沙山地形. *南京大学学报(自然科学版)*, 1959(2): 93-106.]
- [18] Yang Dayuan. The primary study of the dating and causes of the Changjiang (Yangtze) River flowing eastwards into the sea. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 1985, 21(1): 155-165. [杨达源. 长江中下游干流东去入海的时代与原因的初步探讨. *南京大学学报(自然科学版)*, 1985, 21(1): 155-165.]
- [19] Xiang Fang, Wang Chengshan, Li Guozhong, et al. Character of heavy minerals in Quaternary sediments in Yichang area and its relationship with cut through of the Yangtze Three Gorges, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(2): 117-121. [向芳, 王成善, 李国忠, 等. 宜昌地区第四纪沉积物重矿物特征及其与三峡贯通的关系. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(2): 117-121.]
- [20] Xiang F, Zhu L D, Wang C S, et al. Quaternary sediment in the Yichang area: Implications for the formation of the Three Gorges of the Yangtze River. *Geomorphology*, 2007, 85(3): 249-258.
- [21] Zhao Xitao, Hu Daogong, Zhang Yongshuang. Genesis and age of the gravels underlying the Xigeda formation of Panzhihua, Sichuan, China, and valley development of the ancient Jinsha River. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(1): 1-12. [赵希涛, 胡道功, 张永双. 四川攀枝花昔格达组下伏砾石层成因和时代探讨与古金沙江河谷发育. *地球学报*, 2008, 29(1): 1-12.]
- [22] Pan D D, Li C X. Timing of the Yangtze initiation draining the Tibetan Plateau throughout to the East China Sea: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 2008, 2(3): 302-313.
- [23] Li Ting, Li Chang'an, Kang Chunguo, et al. Sedimentary environment and geomorphological significance of the gravel bed in Yichang. *Geology in China*, 2010, 37(2): 438-445. [李庭, 李长安, 康春国, 等. 宜昌砾石层的沉积环境及地貌意义. *中国地质*, 2010, 37(2): 438-445.]
- [24] Zheng H B, Clift P D, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(19): 7556-7561.
- [25] Kang Chunguo, Li Chang'an, Zhang Yufen, et al. Heavy mineral characteristics of the Yichang gravel layers and provenance tracing. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(2): 254-262. [康春国, 李长安, 张玉芬, 等. 宜昌砾石层重矿物组合特征及物源示踪分析. *地质学报*, 2014, 88(2): 254-262.]
- [26] Zhang Jian, Hu Xiaofei, Gen Haopeng, et al. Drainage evolution in history in Jiudong basin since the Pleistocene inferred from heavy mineral characteristics in cores and modern pluvial deposits. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36

- (10): 1595-1604. [张建, 胡小飞, 耿豪鹏, 等. 钻孔及现代河流重矿物特征揭示的更新世以来酒东盆地水系演化历史. 地理科学, 2016, 36(10): 1595-1604.]
- [27] Pan B T, Chen D B, Hu X P, et al. Drainage evolution of the Heihe River in western Hexi Corridor, China, derived from sedimentary and magnetostratigraphic results. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 150: 250-263.
- [28] Hu Z B, Pan B T, Wang J P, et al. Fluvial terrace formation in the eastern Fenwei Basin, Chian, during the past 1.2 Ma as a combined archive of tectonics and climate change. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 235-245.
- [29] Hu Z B, Pan B T, Guo L Y, et al. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 133: 1-14.
- [30] Lu H H, Burbank D W, Li Y L. Alluvial sequence in the north piedmont of the Chinese Tian Shan over the past 550 kyr and its relationship to climate change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 285: 343-353.
- [31] Lu H H, Zhang T Q, Zhao J X, et al. Late Quaternary alluvial sequence and uplift-driven incision of the Urumqi River in the north front of the Tian Shan, northwestern China. *Geomorphology*, 2014, 219(219): 141-151.
- [32] Zhao Zhijun, Liu Yong, Chen Ye, et al. Quaternary fluvial incision rates of the Western Sichuan Plateau inferred from ESR chronology. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, 49(2): 160-165, 172. [赵志军, 刘勇, 陈晔, 等. 基于 ESR 年代的川西高原河流下切速率. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 160-165, 172.]
- [33] Antoine P, Moncel M H, Locht J L, et al. Dating the earliest human occupation of Western Europe: New evidence from the fluvial terrace system of the Somme basin (Northern France). *Quaternary International*, 2015, 370: 77-99.
- [34] Liu C R, Yin G M, Han F. Effects of grain size on quartz ESR dating of Ti-Li center in fluvial and lacustrine sediments. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 513-518.
- [35] Sancho C, Calle M, Peña-Monné J L, et al. Dating the Earliest Pleistocene alluvial terrace of the Alcanadre River (Ebro Basin, NE Spain): Insights into the landscape evolution and involved processes. *Quaternary International*, 2016, 407(Part A): 86-95.
- [36] Miao X, Lindsey D A, Lai Z, et al. Contingency table analysis of pebble lithology and roundness: A case study of Huangshui River, China and comparison to rivers in the Rocky Mountains, USA. *Sedimentary Geology*, 2010, 224(1-4): 49-53.
- [37] Zhu Dagang, Zhao Xitao, Meng Xiangang, et al. Fabric analysis of gravel in Quaternary gravel beds on backbone area of Niqingtanggulashan Mountains. *Journal of Geomechanics*, 2002, 84: 323-332. [朱大岗, 赵希涛, 孟宪刚, 等. 念青唐古拉山主峰地区第四纪砾石层砾组分析. 地质力学学报, 2002, 84: 323-332.]
- [38] Zhang Yimei, Wang Jianli, Zhong Jun. The gravel statistics and sedimentary environment of Jiangbei conglomerate in Chongqing. *Journal of Chongqing University (Natural Science)*, 2013, 30(1): 48-52. [张宜梅, 王建力, 钟俊. 重庆江北砾岩的砾石统计及其沉积环境探究. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2013, 30(1): 48-52.]
- [39] Mei Hui, Hu Dao Hua, Chen Fangming, et al. Study on the statistical analysis of gravels at Yangluo in Wuhan city. *Earth and Environment*, 2011, 39(1): 42-47. [梅惠, 胡道华, 陈方明, 等. 武汉阳逻砾石层砾石统计分析研究. 地球与环境, 2011, 39(1): 42-47.]
- [40] Hu Chunsheng, Wu Li, Yang Lihui. Gravel fabric and sedimentary environment of terrace gravel layers of the upper Qingyijiang River at Jingxian county. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 951-958. [胡春生, 吴立, 杨立辉. 青弋江上游泾县段阶地砾石层砾组结构及其沉积环境研究. 地理科学, 2016, 36(6): 951-958.]
- [41] Yan Xiangsheng, Huang Zhiqiang. Quaternary sedimentation and paleoenvironmental changes of the Qingyijiang River area and the Shuiyang River area in the southern Anhui province. *Journal of Xuzhou Teachers College*, 1991, 9(1): 58-64. [严庠生, 黄志强. 皖南青弋江、水阳江地区第四纪沉积与环境变迁. 徐州师范学院学报(自然科学版), 1991, 9(1): 58-64.]
- [42] Yan Xiangsheng. Landforms and neotectonics of the Qingyijiang River area and the Shuiyang River area in the southern Anhui province. *Journal of Nanjing Teachers College*, 1999, 15(4): 118-124. [严庠生. 皖南青弋江、水阳江地区地貌与新构造运动. 南京师范专科学校学报, 1999, 15(4): 118-124.]
- [43] Zhou Binggen. An analysis on the characteristics of the periglacial geomorphy and palaeoenvironment during the Quaternary of Mount Huangshan. *Journal of Anhui Normal University*, 1992(1): 68-74. [周秉根. 黄山第四纪冰缘地貌特征与古环境分析. 安徽师范大学学报, 1992(1): 68-74.]
- [44] Fang Hongqi. Neotectonic movement in the middle and lower reaches of the Yangtze River region. *Acta Geologica Sinica*, 1959, 39(3): 328-343. [方鸿琪. 长江中下游地区的新构造运动. 地质学报, 1959, 39(3): 328-343.]
- [45] Powers M C. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 1953, 23(2): 117-119.
- [46] Bridgland D R, D'Olier B. The Pleistocene evolution of the Thames and Rhine drainage systems in the southern North Sea Basin. *Geological Society London Special Publications*, 1995, 96: 27-45.
- [47] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 603-609.

- [48] Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Magentostratigraphy and paleoclimatic significance of an eolian sequence from the Xuancheng area, Anhui province. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(4): 369-375. [乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 安徽宣城黄土堆积的磁性地层学. *地质力学学报*, 2002, 8(4): 369-375.]
- [49] Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Loess- soil sequences in southern Anhui province: Magentostratigraphy and paleoclimatic significance. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(13): 1465-1469. [乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 皖南风尘堆积: 土壤序列的磁性地层学研究及其古环境意义. *科学通报*, 2003, 48(13): 1465-1469.]
- [50] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun, et al. The Problems of Quaternary Glacier and Environment in the East China. Beijing: Science Press, 1989. [施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [51] Zhou Binggen, Li Gang, Wang Jiegui, et al. An analysis of the sediment formation of the Quaternary mudstone in the Mount Huangshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(4): 360-365. [周秉根, 李刚, 王结贵, 等. 黄山第四纪泥砾沉积物的成因分析. *冰川冻土*, 1992, 14(4): 360-365.]
- [52] Huang Peihua. A study on the sedimentation mechanism and environments of Quaternary boulder clay deposits at piedmont in Mount Huangshan, Anhui Province. *Scientia Geographica Sinica*, 1994, 14(3): 211-216. [黄培华. 黄山山麓第四纪粘土砾石层形成机制和环境的研究. *地理科学*, 1994, 14(3): 211-216.]
- [53] Huang Peihua, Diffenel R F, Yang Mingqin, et al. Mountain evolution and environmental changes of Huangshan, China. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(5): 401-408. [黄培华, Diffenel, R F, 杨明钦, 等. 黄山山地演化与环境变迁. *地理科学*, 1998, 18(5): 401-408.]
- [54] Zhou Binggen. Analysis on the fractal structure features and sedimentary environment of the boulder clay of the Quaternary in Mt. Huangshan. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(1): 92-94. [周秉根. 黄山第四纪泥砾沉积物分形结构特征与沉积环境分析. *地理科学*, 1999, 19(1): 92-94.]
- [55] Maddy D, Bridgland D R, Westaway R. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK. *Quaternary International*, 2001, 79(1): 23-36.
- [56] Vandenberghe, J. Climate forcing of fluvial system development: An evolution of ideas. *Quaternary Science Review*, 2003, 22: 2053-2060.
- [57] Schumm S A. River response to base level change: Implications for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 279-294.
- [58] Bridgland D R. Fluvial deposition on periodically emergent shelves in the Quaternary: Example records from the shelf around Britain. *Quaternary International*, 2002, 92(1): 25-34.
- [59] Bridgland D R, Westaway R. Quaternary fluvial archives and landscape evolution: A global synthesis. *Proceedings of the Geologist's Association*, 2014, 125(5/6): 600-629.
- [60] Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in southern China. *Quaternary Science*, 2008, 28(1): 1-13. [袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 1-13.]
- [61] Jiang Fuchu, Wu Xihao, Xiao Huaguo, et al. Age of the vermiculated red soil in Jiujiang area, central China. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3(4): 27-32. [蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 九江地区网纹红土的时代. *地质力学学报*, 1997, 3(4): 27-32.]
- [62] Huang Jiangnong, Fang Jiahua, Shao Jiaji, et al. Study on the depositional age of the Xiashu Loess in Nanjing. *Geological Review*, 1998, 34(3): 240-247. [黄姜依, 方家骅, 邵家骥, 等. 南京下蜀黄土沉积时代的研究. *地质评论*, 1988, 34(3): 240-247.]
- [63] Li Fengquan, Ye Wei, Zhu Lidong, et al. The types and formation of quaternary plinthitic red earth. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 346-355. [李凤全, 叶玮, 朱丽东, 等. 第四纪网纹红土的类型及网纹化作用. *沉积学报*, 2010, 28(2): 346-355.]
- [64] Yin Qiuzhen, Guo Zhengtang. Mid-Pleistocene vermiculated red soils in southern China as an indication of unusually strengthened East Asian monsoon. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 186-193. [尹秋珍, 郭正堂. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期. *科学通报*, 2006, 51(2): 186-193.]
- [65] Cui Z J, Wu Y Q, Liu G N, et al. On Kunlun-Yellow River tectonic movement. *Science China Earth Sciences*, 1998, 41(6): 592-600.
- [66] Li J J, Fang X M. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(23): 2117-2124.
- [67] Ma Zhenxing, Yu Zhiqing. Quaternary stratigraphic section along the Changhong highway in Jiujiang, Jiangxi. *Regional Geology of China*, 2001, 20(4): 352-358. [马振兴, 余志庆. 江西九江长虹大道第四纪地层剖面特征. *中国区域地质*,

2001, 20(4): 352-358.]

- [68] Zhou Binggen, Pan Baolin, Wang Xinyuan, et al. A preliminary research on neotectonics of Mt. Huangshan. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 1995, 18(3): 53-58. [周秉根, 潘宝林, 王心源, 等. 黄山新构造运动初探. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 18(3): 53-58.]

The river development of the Qingyijiang River in the northern piedmont of Mt. Huangshan

HU Chunsheng^{1,2}, LIU Shaochen^{1,2}, HU Chenqi^{1,2}, CAO Le^{1,2}, ZHOU Yingqiu^{1,2}

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, Anhui, China;

2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Preventing and Controlling, Wuhu 241002, Anhui, China)

Abstract: The Qingyijiang River, which is located in the northern piedmont of Mt. Huangshan, is the longest branch of the lower Yangtze River. Based on the field survey, a well-preserved sequence of one diluvial platform (*P*) and three river terraces (i.e., T3, T2 and T1) was found, and a corresponding sequence of four gravel beds was also presented, according to two natural sections of Xikou cross section and Chengbei cross section in the Jingxian Basin. In addition to the gravel fabric analysis method, the Electron Spin Resonance dating and palaeomagnetic dating were used to discuss the age, process and cause of river development of the Qingyijiang River. This study concludes that: (1) the results of the gravel fabric analysis show that the T3 terrace is the oldest terrace of the Qingyijiang River, and the T3 gravel bed is the oldest gravel bed of the same river; (2) the dating results show that the formation timing of the Qingyijiang River can be traced back to the period from ~1300 ka BP to ~900 ka BP, and the oldest timing of the river is ~1300 ka BP, whereas the most recent timing is ~900 ka BP; (3) the Qingyijiang River originated from one of the braided rivers on the diluvial fan before 1377 ka BP, and successively experienced three stages of the diluvial fan and braided rivers, the incision by the braided river and the Qingyijiang River formation, that is, the so-called development model of the Qingyijiang River from one braided river on the diluvial fan; and (4) the development of the Qingyijiang River may be a combined result of precipitation increase and tectonic uplift. This study provides a reference for the studies of the small and medium river development in eastern China.

Keywords: Qingyijiang River; river terrace; gravel bed; gravel fabric analysis; age; river development