

doi:10.3799/dqkx.2016.052

# 洞庭盆地 S3-7 孔第四纪年代地层

赵举兴<sup>1</sup>, 李长安<sup>1,2</sup>, 张玉芬<sup>3\*</sup>, 强小科<sup>4</sup>, 熊德强<sup>3</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

4. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西西安 710075

**摘要:** 洞庭盆地的形成与演化对长江中游乃至中国中部的地质环境变迁具有重要意义, 但区内的第四纪年代地层研究一直不足。以洞庭盆地沉积中心——沅江凹陷的典型钻孔 S3-7 孔(孔深 255.1 m)为研究对象, 在详细的沉积物岩性描述和岩石地层划分的基础上, 系统地进行了古地磁、ESR、AMS<sup>14</sup>C 等测试, 并建立了 S3-7 孔的年代地层序列。通过与其他两口典型钻孔的对比分析, 初步建立了研究区的区域年代地层格架, 结果显示洞庭盆地沉积中心下更新统底界位于各钻孔底部 240~300 m, 中更新统底界位于 90~95 m, 上更新统底界位于 28~50 m, 全新统底界位于 1.5~3.1 m。平均沉积速率和分段线性方程的结果表明洞庭盆地覆盖第四纪区岩石地层单位的时代为: 华田组的地质年龄为 2 590~1 600 ka BP, 湘阴组的地质年龄为 1 600~920 ka BP, 洞庭湖组的地质年龄为 920~120 ka BP, 安乡组的地质年龄为 120~11 ka BP, 全新统的地质年龄为 11 ka BP 至今。

**关键词:** 洞庭盆地; 第四纪; 年代地层; 古地磁; 地质年代学; 地层学。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2016)04-0633-11

收稿日期: 2015-09-29

## Quaternary Chronostratigraphy of Borehole S3-7 in Dongting Basin

Zhao Juxing<sup>1</sup>, Li Chang'an<sup>1,2</sup>, Zhang Yufen<sup>3\*</sup>, Qiang Xiaoke<sup>4</sup>, Xiong Deqiang<sup>3</sup>

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China

**Abstract:** The formation and evolution of the Dongting basin are important for understanding the geological environmental evolution of the middle Yangtze drainage and even central China. However, Quaternary chronostratigraphy is still controversial in the area. In this study, one continuous borehole S3-7 with a depth of 255.1 m was taken from the Yuanjiang depression, the deposition center of the Dongting basin. Based on detailed stratigraphic and lithological interpretations, the borehole was dated by paleomagnetism, ESR and AMS<sup>14</sup>C, to establish its chronostratigraphic sequence. Compared with other two typical boreholes, the Quaternary chronostratigraphic sequence of the Dongting basin was established. The results suggest that the Plio-Pleistocene and Early-Middle Pleistocene boundaries of the central Dongting basin are located at the depths of 240–300 m and 90–95 m, respectively, and the boundaries of Middle-Late Pleistocene and Pleistocene/Holocene are located at the depths of 28–50 m and 1.5–3.1 m, respectively. Average deposition rate and piecewise linear equation show that the timing of lithological units in coverage area are as follows: 2 590–1 600 ka BP for the Huatian Formation, 1 600–920 ka BP for the Xiangyin Formation, 920–120 ka BP for the Dongtinghu Formation, 120–11 ka BP for the Anxiang Formation and younger than 11 ka BP for the Holocene.

**Key words:** Dongting basin; Quaternary; chronostratigraphy; paleomagnetism; geochronology; stratigraphy.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No.41440002); 中国地质调查局项目(No.1212011121142)。

**作者简介:** 赵举兴(1986—), 男, 博士生, 主要从事第四纪地质学方面的研究。E-mail: zhaojuxing1986@126.com

\* 通讯作者: 张玉芬, E-mail: zhyfcug@163.com

**引用格式:** 赵举兴, 李长安, 张玉芬, 等, 2016. 洞庭盆地 S3-7 孔第四纪年代地层. 地球科学, 41(4): 633–643.

## 0 引言

洞庭盆地是长江中游最大的第四纪沉积盆地之一。盆地位于 $28^{\circ}10' \sim 29^{\circ}50'N$ ,  $110^{\circ}30' \sim 113^{\circ}10'E$ , 以雪峰山一线丘陵为南界, 北面抵华容次级隆起与江汉盆地相隔, 西临武陵山地, 东面为幕阜山隆起, 外貌整体上呈现向南凸起的不规则菱形, 东西方向最大距离约为 240 km, 南北方向最大距离约为 180 km, 总面积达  $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。洞庭盆地主要是在构造沉降的基础上, 由湘江、资水、沅江和澧水 4 大水系以及长江的沉积物充填而成, 绝大部分地区被第四纪沉积物覆盖(图 1); 盆地主体自西向东分为

安乡凹陷、赤山隆起和沅江凹陷 3 个次级构造单元(柏道远等, 2010a)。洞庭盆地的形成与演化对长江中游乃至中国中部的地质环境变迁具有重要意义, 同时对长江中下游防洪工程(李长安, 2015)和洞庭盆地地下水赋存规律及地下水开发利用的研究具有重要的指导意义。

前人依据盆地周缘剖面和盆地内部钻孔, 通过沉积物分布特征和空间对比, 对洞庭盆地的第四纪沉积、环境演化、构造活动特征以及洞庭湖演化过程取得了大量的认识。在沉积、环境演化方面, 王春林(1992)较系统地阐述了洞庭盆地第四纪各阶段的演化特征; 皮建高和张国梁(1993)通过计算能量指数

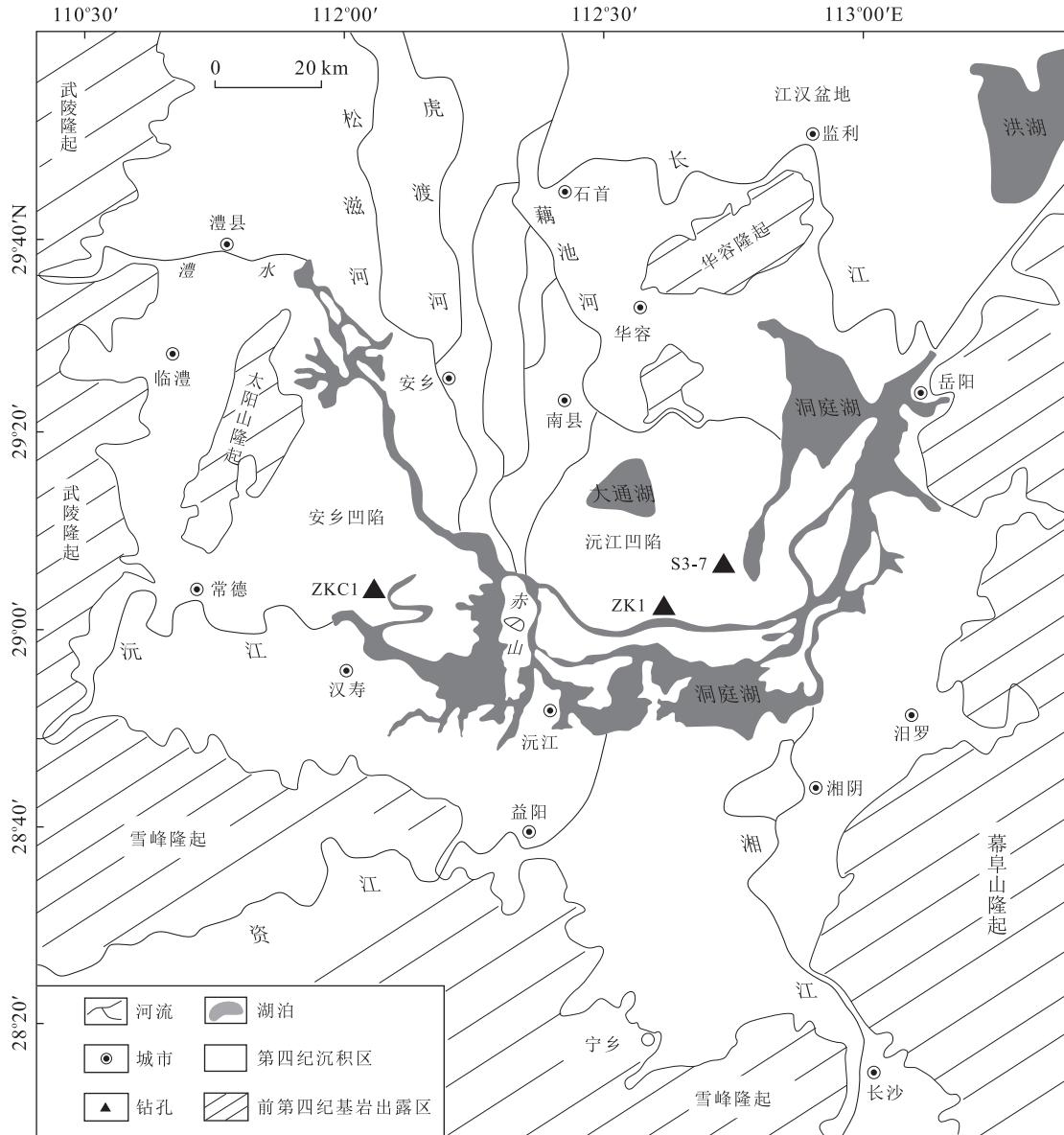


图 1 洞庭盆地典型钻孔位置

Fig.1 Location of typical boreholes in the Dongting basin

和沉积环境分区,建立了洞庭湖水系各大支流在早更新世早期流经路线的轮廓;此后皮建高等(2001)利用水流能量指数分析了洞庭盆地第四纪沉积环境的演变特征,指出洞庭盆地主要为河流—过流型湖泊相互消长的沉积环境,同时提出沉积环境的演变及主要水流方向受差异性构造沉降的控制。依据岩相、沉积相、孢粉特征以及其他环境替代指标,洞庭盆地第四纪气候变化时期的划分并不完全一致(景存义,1982;蔡述明等,1984),但总体反映出洞庭湖区第四纪以来气候变化具有以下规律(张人权等,2001):更新世气候变化剧烈,气候组合为暖湿(温湿)与冷干;全新世气候转为温凉,主要气候组合为温湿与凉干。构造活动特征方面,杨达源(1986)较早分析了洞庭盆地晚中生代以来的构造演变,着重分析了全新世以来洞庭湖的演变和原因;通过第四系分统等厚度图、构造—沉积地貌类型划分和钻孔分析,张人权等(2001)和柏道远等(2010b,2011)分别系统阐述了洞庭盆地第四纪构造演化过程。洞庭湖演化过程方面,张晓阳等(1994)根据全新世沉积物的岩性、岩相特征和文化遗址的时空分布,结合孢粉资料与历史文献记载,揭示了全新世以来洞庭湖演变的6个阶段;苏成等(2001)着重分析了人类活动对洞庭湖演化的影响,并根据历史资料论述了洞庭湖区洪涝灾害的发生原因;杜耘和殷鸿福(2003)依据研究区古环境特征和新石器文化遗址分布细化了洞庭湖历史时期的环境特征。

第四纪地层是第四纪沉积、环境演化、构造活动特征等一切研究的基础,因而洞庭盆地的第四纪地层研究颇受学术界的关注(蔡述明等,1984;陈长明和谢丙庚,1996;来红州和莫多闻,2004;李长安等,2006;柏道远等,2010b)。前人虽对洞庭盆地做过大量的第四纪地层研究(来红州等,2005;毛龙江等,2008;赵举兴等,2014),但在洞庭盆地覆盖区揭穿松散沉积层进行系统地层学的研究却较少,而进行过系统的年代学研究的就更少,致使长江中游这样一个重要的沉积盆地,一直没有建立起第四纪年代地层序列。在前人的研究中,仅柏道远(2010)对汉寿县ZKC01孔和张建新等(2007)对沅江市南大新河口村ZK1孔两个揭穿松散层的深孔进行过较系统的年代学研究(图1)。ZKC01孔位于安乡凹陷,294.26 m的岩心只有10个绝对年代数据,缺少古地磁年代测定;ZK1孔位于沅江凹陷,虽进行了古地磁测年,但由于样品数量较少(268.68 m的岩心只有270多个样品数据),测试方法原始,样品处理为交变退

磁,其结果一直未被认可;而在绝对年代测定方面,仅有两个绝对年龄结果。

洞庭盆地由多个次级凹陷组成,沉积物组成和成因、沉积相以及沉积环境复杂多变(陈渡平等,2014),由于年代学研究的不足,使洞庭盆地区域第四纪地层划分和对比长期没有得到很好的解决,并直接影响到环境演化、构造活动等重大地质问题研究的深入。

本次研究选择洞庭盆地的沉积中心——沅江凹陷的S3-7孔为研究对象,在详细岩性描述的基础上进行岩性分层,进而划分岩石地层单位;重点以古地磁测年为主,结合13个绝对年龄测试结果,建立了目前最为完整和年代数据相对较准确的第四系年代序列。结合前人的典型钻孔研究初步构建了洞庭盆地区域年代地层框架,研究成果对盆地内第四系划分、第四系底界以及区域沉积环境演化等方面有重要意义。

## 1 洞庭盆地第四纪岩石地层划分与对比

洞庭盆地第四纪地层的研究始于田奇隽、王晓青对长沙南郊湘江三级阶地上白沙古井附近出露砾石层的命名,即“白沙井组”;此后,湖南区测队、水文队对该区第四纪地层进行了系统研究,初步建立了第四纪地层系统(陈长明和谢丙庚,1996)。需要说明的是,1990年之前的第四系研究对象并非只是洞庭盆地而是整个湖南省;1988年出版的《湖南省区域地质志》(湖南省地质矿产局,1988)第一次将湖南省第四系划分为四水流域和洞庭盆地两个研究区,后者又细分为周缘区和腹地区;2002年在开展长江中游水患区环境地质调查中,根据李长安(2002)的提议又将洞庭盆地按照露头区(周缘低丘岗地区)和覆盖区(平原区)分别厘定了岩石地层单位,之后延续这种划分(图2)。

从划分沿革来看,1990年以后对洞庭盆地第四系划分方案较为一致,主要不同为柏道远(2010)和陈渡平等(2014)将覆盖区下更新统湘阴组改为汨罗组,新建的上更新统坡头组代替安乡组。但湘阴组有利于区分露头区和覆盖区,这也是湘阴组命名时的主要原因(柏道远,2010)。《中国地层典》编委会(2000)将陕西洛川黑木沟下游坡头村的剖面建组为坡头组,在洞庭盆地建立坡头组之前,该组名已被明确使用;同时洞庭盆地建立的坡头组位于安乡凹陷,因此覆盖区上更新统为安乡组更合适。

本文仅涉及覆盖区,参考前人的划分方案,笔者

地层	湖南省地质矿产局(1988)		张国梁等(1990)	皮建高等(2002)		柏道远(2010)		陈渡平等(2014)		本文		
	周缘	腹地	未分区	露头区	覆盖区	露头区	覆盖区	露头区	覆盖区	覆盖区		
全新统	冲积层	湖积层	冲积层、冲洪积层(Qh)	冲积层、冲洪积层(Qh)	赤沙组(Qh:c)	全新世冲积层(Qh <sup>a1</sup> )	未定,包括冲积、湖积、湖冲积等(Qh <sup>a1</sup> , Qh <sup>l</sup> , Qh <sup>al</sup> )	全新世冲积层(Qh <sup>a1</sup> )	赤沙组(Qh:c)	未定(Qh)		
					团洲组(Qh:z)				团洲组(Qh:z)			
					沅江组(Qh:y)				沅江组(Qh:y)			
上更新统	白水江组 下蜀组 缺失	马王堆组 白沙井组 陈家咀组 新开铺组 黄牯山组 汨罗组 湖仙山组	白水江组(Qp:bs)	白水江组(Qp:bs)	安乡组(Qp:a)	白水江组(Qp:bs)	坡头组(Qp:p)	白水江组(Qp:bs)	坡头组(Qp:p)	安乡组(Qp:a)		
中更新统			马王堆组(Qp:mw)	马王堆组(Qp:mw)	洞庭湖组(Qp:dt)	马王堆组(Qp:mw)	洞庭湖组(Qp:dt)	马王堆组(Qp:mw)	洞庭湖组(Qp:dt)	洞庭湖组(Qp:dt)		
			白沙井组(Qp:b)	白沙井组(Qp:b)		白沙井组(Qp:b)		白沙井组(Qp:b)				
			新开铺组(Qp:x)	新开铺组(Qp:x)		新开铺组(Qp:x)		新开铺组(Qp:x)				
下更新统			汨罗组(Qp:m)	汨罗组(Qp:m)	湘阴组(Qp:xy)	汨罗组(Qp:m)	汨罗组(Qp:m)	汨罗组(Qp:m)	汨罗组(Qp:m)	湘阴组(Qp:xy)		
			华田组(Qp:ht)	黄土山组(Qp:hs)	华田组(Qp:ht)	缺失	华田组(Qp:ht)	华田组(Qp:ht)	华田组(Qp:ht)	华田组(Qp:ht)		

图 2 洞庭盆地第四系划分

Fig.2 Division of Quaternary in the Dongting basin

括号内为各岩石地层单位代号。《湖南省区域地质志》对洞庭盆地第四系只划分了更新统和全新统,并未将更新统三分,同时该专著中未系统列出各岩石地层代号

表 1 洞庭盆地覆盖区第四纪岩石地层单位划分及主要岩性特征

Table 1 Division and characteristics of Quaternary lithostratigraphical units in the Dongting basin coverage area

地层	组(代号)	主要岩性特征
全新统	未分组(Qh)	青灰、褐黄色、灰黑色黏土、粉砂及细砂层,偶见砾石,个别地层含螺蚌壳化石及含腐植物残骸炭化木;一般厚度小于 25 m.
上更新统	安乡组(Qp:a)	总体颜色为褐黄色,上部为褐黄色黏土、粉砂及细砂层,下部为含细砾砂层,未经暴露的可能为青灰色,含铁锰薄膜或结核;厚度可达 20~30 m.
中更新统	洞庭湖组上段(Qp:dt <sup>3</sup> )	总体颜色为褐黄色,上部为褐黄、灰黑色黏土、粉砂,下部为褐黄色、灰色含砾砂层、砾石层;一般厚 20 m,个别可达 50 m.
	洞庭湖组中段(Qp:dt <sup>2</sup> )	总体颜色为黄—褐黄色,上部为褐黄、灰黑色黏土、粉砂,下部为褐黄色、灰色含砾砂层、砾石层,通常由两期沉积旋回构成;一般厚 20 m,个别可达 80 m.
	洞庭湖组下段(Qp:dt <sup>1</sup> )	总体颜色为褐黄—青灰色,上部为灰绿、绛红色黏土、粉砂,下部为褐黄色、灰色含砾砂层、砾石层一般厚 30 m,个别可达 90 m.
下更新统	湘阴组(Qp:xy)	总体颜色为青灰色,上部为灰绿、灰黑色黏土、粉砂,下部为褐灰色、灰色含砾砂层、砾石层;一般厚 60 m,个别可达 100 m.
	华田组上段(Qp:ht <sup>2</sup> )	总体颜色为青灰色,上部为以绛红色为主的杂色黏土,下部为褐灰色、灰色含砾砂层、砾石层;杂色黏土是与湘阴组的分层标志;一般厚 40~60 m,个别可达 100 m.
	华田组下段(Qp:ht <sup>1</sup> )	总体颜色为青灰色,上部为以绛红色、灰绿色为主的杂色黏土,下部为褐灰色、灰色含砾砂层、砾石层;出现大量炭化木碎屑;一般厚 30~40 m,个别可达 100 m.

认为洞庭盆地覆盖区应划分为华田组( $Q_{p_1}ht$ )、湘阴组( $Q_{p_1}xy$ )、洞庭湖组( $Q_{p_2}dt$ )、安乡组( $Q_{p_3}a$ )和全新统( $Qh$ )。各地层岩性主要特征如表1。

## 2 S3-7孔第四纪岩石地层划分及沉积环境

S3-7孔位于洞庭盆地中部、沅江市南大膳镇南金山村,地理坐标为 $29^{\circ}02'56''N, 112^{\circ}41'37''E$ ,地表高程为海拔26.5 m(图1)。钻孔深为255.1 m,第四纪松散沉积层厚为244.63 m;钻孔直径为98 mm,每钻进尺1~4 m,个别含砾粗砂层与砾石层单次取心率为80%~90%,其余回次单次取心率均大于90%,钻孔平均取心率为93.5%。S3-7孔沉积连续,沉积序列完整清晰,由279个自然沉积层组成,可归纳划分为40个岩性层。

总体上看,从沉积物的颜色可将S3-7分为3段,下段包括24~39等16个岩性层,颜色以青灰色为主,沉积物粒度较细,多为砂层及粉砂质黏土层,偶见细砾石层;中段包括7~23等17个岩性层,颜色以褐黄色为主,沉积物粒度较粗,多为含砾粗砂层;上段包括1~6等6个岩性层,颜色以褐黄色为主,底部为细砾石层,上部为细砂层及粉砂质黏土层。从沉积物的粒度变化看,可划分出19个沉积旋回,以108.54 m为界,以上沉积旋回变化明显加快(图3)。

S3-7孔第四纪岩石地层单位发育齐全,各标志层清晰。根据S3-7孔岩性分层、沉积旋回及选定的覆盖区划分方案,将S3-7孔第四系自下而上划分为华田组( $Q_{p_1}ht$ )、湘阴组( $Q_{p_1}xy$ )、洞庭湖组( $Q_{p_2}dt$ )、安乡组( $Q_{p_3}a$ )、全新统( $Qh$ )等5个岩石地层单位。各岩石地层单位特征及沉积序列描述如表2。

表2 S3-7孔第四纪岩石地层及沉积环境

Table 2 Quaternary lithostratigraphical units and sedimentary environments of the borehole S3-7

地质时代	岩石地层	代号	地层特征及沉积序列
全新世	全新统	$Qh$	包括最顶部的1个岩性层,由一期沉积旋回组成,与下伏安乡组假整合接触,底部为褐黄色粉砂质黏土与青灰色黏土互层,顶部为浅褐色粉砂质黏土层,沉积环境由缓流的河漫滩沉积到静水湖沼沉积,厚3.04 m
	安乡组	$Q_{p_3}a$	包括2~6等5个岩性层,由一期沉积旋回组成,与下伏洞庭湖组假整合接触,底部为浅青灰色细砾石层,略显正粒序结构;中部为褐黄色细一中砂层;顶部为褐黄色黏土质粉砂层,见铁锰结核,沉积环境由河流沉积逐渐过渡为缓流或静水湖相沉积,厚25.46 m
	洞庭湖组上段	$Q_{p_2}dt^3$	包括7~12等6个岩性层,由三期沉积旋回组成,底部为黄一褐黄色含细砾粗砂层,上覆褐黄色粗砂层;中部为黄色含细砾粗砂层,上覆褐黄色、绛红色黏土互层;顶部为深褐黄色细砾石层,上覆浅褐黄色含砾粗砂层。该段出现较厚的砾石层,反映出河流水动力的增强,厚31.41 m
	洞庭湖组中段	$Q_{p_2}dt^2$	包括13~16等4个岩性层,由两期沉积旋回组成,底部为褐黄色含细砾粗砂层,上覆粉红、浅紫色为主的杂色黏土与粉砂质黏土互层,偶见铁壳;中部为褐黄色含砾中一粗砂层;顶部为褐黄色中一粗砂层。中段含砾砂层厚度明显增大,反映该段水动力一直较强,厚23.82 m
更新世	洞庭湖组下段	$Q_{p_2}dt^1$	包括17~23等7个岩性层,由三期沉积旋回组成,底部为褐黄一青灰色含细砾粗砂层,偶见白云母碎片,上覆褐黄一青灰色细砂层及黏土层;中部为褐黄一青灰色含细砾中一粗砂层,夹褐黄色、灰黑色、黑绿色花纹;顶部为绛红色、褐黄色、青灰色黏土互层。三期沉积旋回中沉积物的二元结构明显,为典型的河流沉积,同时三期沉积旋回底部均为含砾粗砂,向上为中一粗砂或黏土,反映经历了三期下部为河流急流相沉积而顶部缓流或静水沉积,厚24.81 m
	湘阴组	$Q_{p_1}xy$	包括24~30等7个岩性层,由四期沉积旋回组成,与下伏华田组整合接触,底部为青灰色细一中砂层,见大量白云母碎片,上覆青灰色粉砂质黏土层;中部为青灰色、褐黄色含细砾粗砂层,偶见白云母碎片;顶部为青灰色中一粗砂层,多见白云母碎片与铁锰结核。总体上为河流沉积为主的河湖交替的沉积环境,厚66.00 m
	华田组上段	$Q_{p_1}ht^2$	包括31~35等5个岩性层,由两期沉积旋回组成,底部为青灰色含细砾中一粗砂,上覆青灰色、黑灰色粉砂与杂色粉砂质黏土互层;中部为青灰色、褐黄色含细砾细砂层,偶见白云母碎片;顶部为绛红色为主的杂色粉砂质黏土与黏土互层,偶见铁壳。该段同样为河湖频繁交替的沉积特征,厚34.74 m
	华田组下段	$Q_{p_1}ht^1$	包括36~39等4个岩性层,由两期沉积旋回组成,底部为青灰色细砂层,上覆绛红色为主的杂色粉砂质黏土与黏土互层,见大量铁锰结核;中部为青灰色细砂层,多见炭化木块;顶部为青灰色、灰黑色粉砂质黏土互层,偶见炭化木块。该段的沉积环境大致经历了河流相→湖泊相→河流相→湖泊相的演变,厚35.35 m

### 3 S3-7 孔年代地层序列

S3-7 孔中共取 1 421 个样品进行古地磁年龄测定, 同时取绝对年龄样品 13 个, 其中<sup>14</sup>C 样品 4 个, ESR 样品 9 个。

<sup>14</sup>C 样品取自浅层含碳量较多的黏土层, AMS <sup>14</sup>C 测试由 Poznan Radiocarbon Laboratory(波兰波兹南放射性碳实验室)完成。基于该实验室测量的 4 个 AMS <sup>14</sup>C 年龄, 笔者采用最新的 IntCal09 校正曲线(Reimer *et al.*, 2009), 用 Calib601 校正程序(<http://calib.qub.ac.uk/calib/>)将所有<sup>14</sup>C 年龄校正为日历年(0 BP=1950 AD), 其测试及校正结果如表 3。

ESR 样品取自砂层。先后用双氧水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、稀盐酸(HCl)和氢氟酸(HF)去除分选后样品(100~140 μm)中的有机质、碳酸盐和长石, 接着去除酸处理后样品中的磁性矿物, 得到石英含量较高的测试样品; 用附加法获得样品的等效剂量(ED); 根据样品中铀、钍、钾、含水量和样品的埋藏采样位置计算获得样品的剂量率(D); 用等效剂量除以剂量率即可获得沉积物的埋藏年龄(刘春茹等, 2011)。ESR 样品的测试由成都理工大学完成(表 4)。

古地磁样品取自粒度较细的沉积物, 砂层与砾石层中未取样, 取样间距为 5 cm。为了能完整反映和

测定到古地磁信息, 样品的采样间隔以不同岩性, 均衡分布为原则。本次研究将 1 421 个古地磁样品分为两批, 样品编号为奇数的进行交变退磁处理, 样品编号为偶数的进行热退磁处理(强小科等, 2010), 两种退磁处理均在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室由强小科研究员负责完成。

古地磁的测试结果(熊德强, 2014)显示 S3-7 孔的古地磁极性排列比较规律, 结合绝对年龄的测试结果, 可将其与标准地磁极性年表进行对比(Lisiecki and Raymo, 2005)。钻孔自上而下可以分为 2 个明显极性时, 布容(Brunhes)正极性时(0~0.78 Ma BP)位于 0~90.0 m, 松山(Matryama)负极性时(0.78~2.59 Ma BP)位于 90.0~244.6 m。布容(Brunhes)正极性时包含一些负极性亚时, 但由于没有更加精确的测年数据, 无法与标准极性柱中的极性亚时一一对应; 贾拉米洛(Jaramillo)正极性亚时(0.99~1.07 Ma BP)、奥杜威(Olduvai)正极性亚时(1.77~1.95 Ma BP)和留尼汪(Reunion)正极性亚时(2.14~2.44 Ma BP)分别位于 101.0~121.0 m、163.0~191.0 m 和 221.0~238.0 m(图 3)。S3-7 孔的古地磁的测试结果与江汉盆地第四纪年代学研究较深入的周老孔和新沟孔的古地磁结果有较好的一致性。

表 3 S3-7 孔 AMS <sup>14</sup>C 测试结果

Table 3 Dating results of AMS <sup>14</sup>C in the borehole S3-7

样品编号	深度(m)	测试材料	<sup>14</sup> C 年龄(a BP)	校正年龄±1δ(a BP)	校正年龄±2δ(a BP)
<sup>14</sup> C-1	1.5	黏土	2 720±30	2 814±32	2 818±58
<sup>14</sup> C-2	1.8	黏土	3 350±30	3 860±33	3 868±57
<sup>14</sup> C-3	3.8	黏土	14 850±70	18 386±84	17 973±203
<sup>14</sup> C-4	13.3	黏土	20 810±890	24 918±1 139	24 810±7 040

表 4 S3-7 孔 ESR 测年结果

Table 4 Dating results of ESR in the borehole S3-7

样品编号	深度(m)	测试材料	ED(Gy)	D(Gy/ka)	年龄(ka BP)
ESR-1	54.4	细砂	624.6±61.0	4.364	143±14
ESR-2	68.4	细砂	927.6±78.0	3.910	237±20
ESR-3	83.3	细砂	920.5±92.0	2.187	421±42
ESR-4	103.0	细砂	4 060.6±397.0	4.960	819±80
ESR-5	123.6	细砂	4 177.8±391.0	3.914	1 068±100
ESR-6	144.5	细砂	5 587.5±540.0	4.912	1 137±110
ESR-7	200.6	细砂	5 890.6±468.0	3.120	1 888±150
ESR-8	223.8	细砂	8 425.5±746.0	3.732	2 258±200
ESR-9	240.7	细砂	8 900.0±762.0	3.809	2 337±200

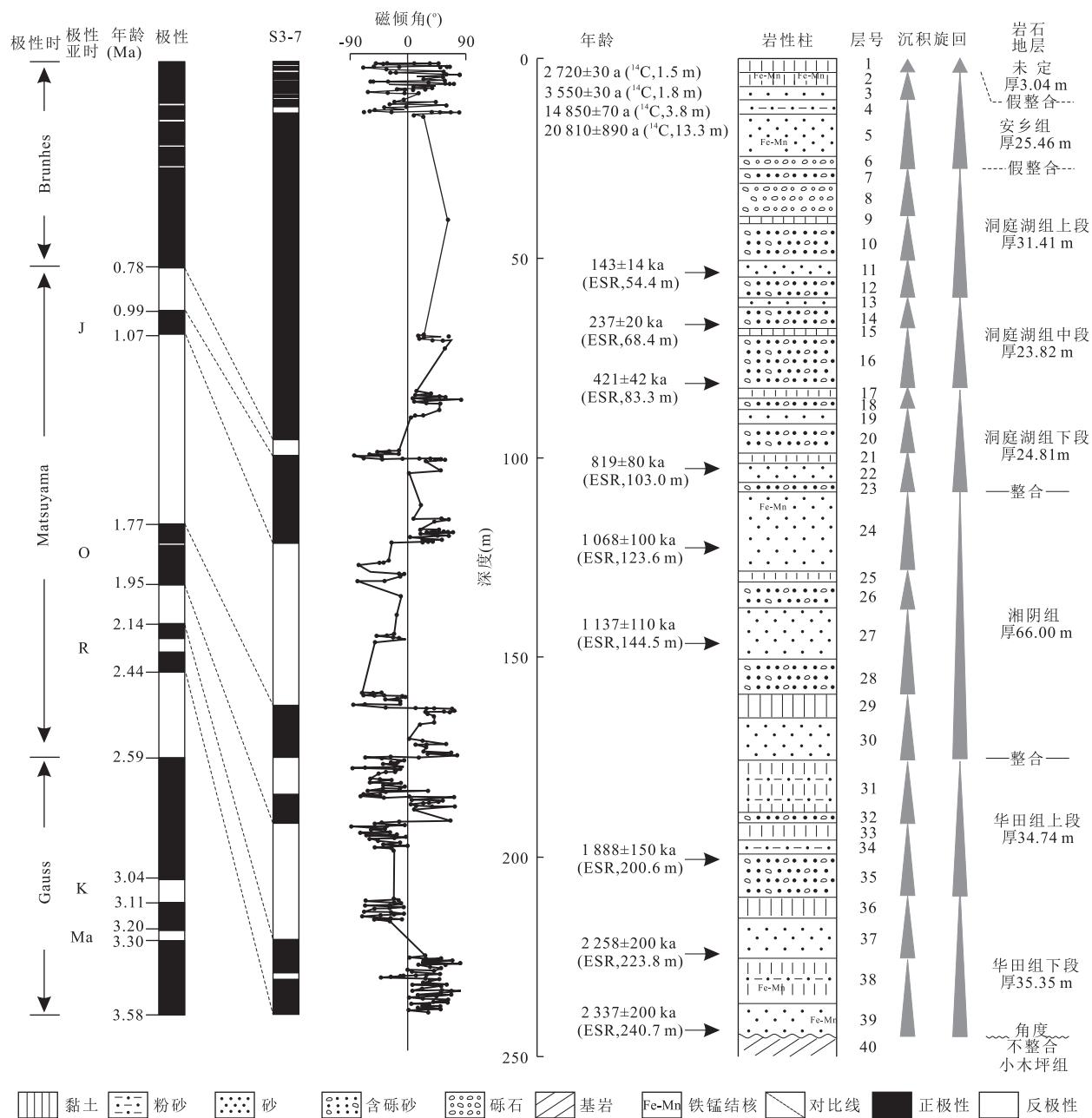


图3 S3-7孔综合地层划分

Fig.3 Division of integrated stratigraphy in the borehole S3-7

上更新统底界与全新统底界在钻孔中的位置可通过计算获得。用  $H$ 、 $R$  和  $T$  分别表示深度区间 (m)、平均沉积速率 (m/a) 和年龄 (ka), 设相邻的两个年龄控制点的埋深分别为  $H_1$  和  $H_2$ , 年龄分别为  $T_1$  和  $T_2$ , 则两个年龄控制点之间的沉积厚度为  $H_2 - H_1$ , 年代间距为  $T_2 - T_1$ , 可以知道从  $T_2$  到  $T_1$  之间的平均沉积速率  $R_{T_2-T_1}$  为(许炯心, 2007):

$$R_{T_2-T_1} = (H_2 - H_1) / (T_2 - T_1).$$

利用平均沉积速率的计算结果结合分段线性方程可得到上更新统底界与全新统底界在钻孔中的位置。

古地磁与绝对年龄以及上述计算结果表明, S3-7孔第四系底界位于孔深 244.6 m 处, 中更新统底界位于孔深 90.0 m 处, 上更新统底界位于孔深 50.0 m 处, 全新统底界位于孔深 3.1 m 处。

#### 4 洞庭盆地区域年代地层格架

洞庭盆地的沉积主体为安乡凹陷和沅江凹陷, 将位于这两个沉积凹陷内具有完整年代序列的钻孔进行对比, 可以初步建立洞庭盆地区域年代地层格

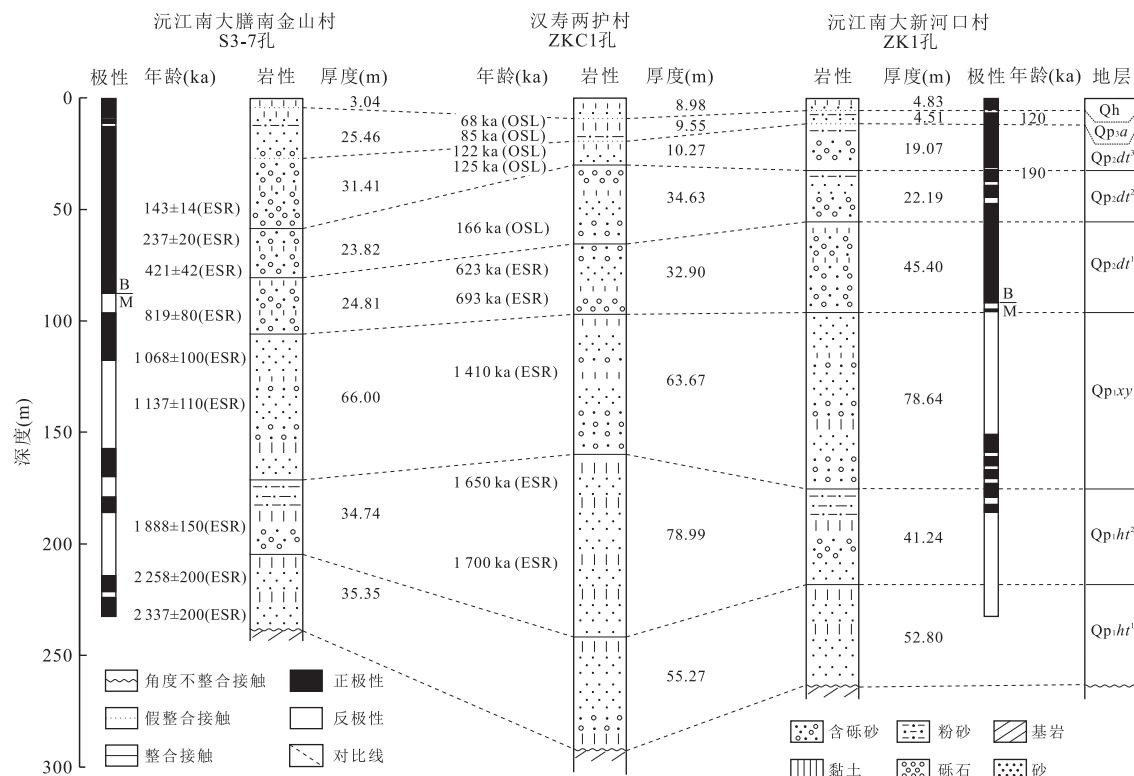


图 4 安乡凹陷—沅江凹陷地层对比

Fig.4 Stratigraphic correlation of Anxiang and Yuanjiang depression

为统一对比,本文将 ZKC01 孔(柏道远,2010)的坡头组改为安乡组;将 ZK1 孔(张建新等,2007)全新世团州组和赤沙组合并为全新统;由于 S3-7 孔与 ZK1 孔下伏基岩为小木坪组,ZKC01 孔下伏基岩为马底驿组,图中未标出华田组下段的下伏岩石地层单位

表 5 各年代地层底界在典型钻孔中的位置

Table 5 Boundaries of chronostratigraphy in typical boreholes

钻孔	位置	全新统孔深(m)	上更新统孔深(m)	中更新统孔深(m)	下更新统孔深(m)
ZKC01	安乡凹陷	1.50	28.00	92.00	294.24
ZK1	沅江凹陷	1.60	12.00	95.00	270.68
S3-7	沅江凹陷	3.10	50.00	90.00	244.63

架(图 4).由于汉寿两护村 ZKC01 孔和沅江南大新河口村 ZK1 孔的年代序列并没有与深度精确对应,各年代地层底界在钻孔中的位置只能通过计算大致获得(表 5).

对比结果显示安乡凹陷与沅江凹陷的下更新统底界和中更新统底界较为统一,下更新统底界位于各钻孔底部,中更新统底界位于 90~95 m 处.上更新统底界与全新统底界出入较大;ZKC01 孔晚更新世以来有 4 个绝对年龄数据且连续性好,但缺乏晚更新世晚期到全新世的年龄;ZK1 孔晚更新世以来仅有 1 个绝对年龄数据,而 S3-7 孔不仅古地磁信息明确,而且顶部的 4 个连续的  $^{14}\text{C}$  数据填补了晚更新世晚期到全新世的空缺(图 3).综上所述,洞庭盆地沉积中心的的下更新统底界位于各钻孔底部

240~300 m,中更新统底界位于 90~95 m 处,上更新统底界位于 28~50 m,全新统底界位于 1.5~3.1 m 处.

由于前人在洞庭盆地第四纪地层研究中第四纪年代学相对薄弱,对岩石地层单位的时代归属研究不够,同时过分强调了多重地层单位界线的一致性,甚至错误地把岩石地层单位当作年代地层单位使用.“组”代表着一种具体的岩石(沉积物)特征,是一种物质地层单位,其本身并不代表某一地质时代;同时“组”在很多情况下是穿时的(李长安,1998).S3-7 孔第四纪岩石地层单位的划分结果明确了各组的深度,利用前文提到的平均沉积速率计算结果和分段线性方程,笔者发现洞庭盆地覆盖区岩石地层单位的时代为:华田组的地质年龄为 2 590~1 600 ka BP,

湘阴组的地质年龄为1 600~920 ka BP,洞庭湖组的地质年龄为920~120 ka BP,安乡组的地质年龄为120~11 ka BP,全新统地层的地质年龄为11 ka BP至今。

## 5 结论

(1) 洞庭盆地S3-7孔沉积连续,可划分为40个岩性层;其中39~24等16个岩性层以青灰色为主,沉积物粒度较细,多为砂层及粉砂质黏土层,偶见细砾石层;23~7等17个岩性层以褐黄色为主,沉积物粒度较粗,多为含砾粗砂层;6~1等6个岩性层以褐黄色为主,底部为细砾石层,上部为细砂层及粉砂质黏土层。

(2) 根据S3-7孔岩性分层、沉积旋回及选定的覆盖区划分方案,将S3-7孔第四系自下而上划分为统华田组( $Q_{p1}ht$ )、湘阴组( $Q_{p1}xy$ )、洞庭湖组( $Q_{p2}dt$ )、安乡组( $Q_{p3}a$ )、全新统( $Qh$ )等5个岩石地层单位。华田组( $Q_{p1}ht$ )可分为2段,总厚度70.09 m,湘阴组( $Q_{p1}xy$ )厚为66.00 m,洞庭湖组( $Q_{p2}dt$ )可分为3段,总厚度为80.04 m,安乡组( $Q_{p3}a$ )厚为25.46 m,全新统( $Qh$ )厚为3.04 m。

(3) 年代学数据显示S3-7孔第四系底界位于孔深244.6 m处,中更新统底界位于孔深90.0 m处,上更新统底界位于孔深50.0 m处,全新统底界位于孔深3.1 m处。

(4) 结合安乡凹陷和沅江凹陷代表性钻孔建立的洞庭盆地第四纪区域年代学格架表明洞庭盆地沉积中心的下更新统底界位于各钻孔底部240~300 m,中更新统底界位于90~95 m,上更新统底界位于28~50 m,全新统底界位于1.5~3.1 m;洞庭盆地覆盖区岩石地层单位的时代为:华田组的地质年龄为2 590~1 600 ka BP,湘阴组的地质年龄为1 600~920 ka BP,洞庭湖组的地质年龄为920~120 ka BP,安乡组的地质年龄为120~11 ka BP,全新统的地质年龄为11 ka BP至今。

致谢:衷心感谢审稿专家、编委和编辑部老师的宝贵建议和悉心帮助;研究生毛欣、李启文、张增杰参与了野外样品的采集,湖南省地质调查院水工环二所姚腾飞提供了大量基础资料,中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室张鹏博士在古地磁对比时提出建议,在此一并表示感谢。

## References

- Bai, D. Y., 2010. Quaternary Geological and Environmental Evolution of the Dongting Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 41—49 (in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Li, C. A., Zhou, K. J., et al., 2010a. Geological Characteristics and Tectonic-Sedimentary Coupling Relation of the Chishan Uplift and Anxiang Sag of Quaternary Dongting Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(4): 645—658 (in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Li, S. W., Zhou, K. J., et al., 2010b. Tectonic-Sedimentary Landform Classification of 1 : 250 000 Changde Sheet and Its Implication for Researches on Quaternary Geology and Environment of Jianghan-Dongting Basin. *Geology in China*, 37(2): 280—297 (in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Wang, X. H., Li, C. A., et al., 2011. Characteristics of Quaternary Tectonic Evolution in Dongting Basin. *Geological Review*, 57(2): 261—276 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral of Hunan Province, 1988. Regional Geology of Hunan Province. Geological Publishing House, Beijing, 263 (in Chinese with English abstract).
- Cai, S. M., Guan, Z. H., Kong, Z. C., et al., 1984. Natural Environment as Reflected in Sedimentary Facies and Sporo-Pollen Assemblages in Dongting Basin in Quaternary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 15(6): 527—539 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. M., Xie, B. G., 1996. Stratigraphical Division and Lower Limit of the Quaternary in Hunan. *Journal of Stratigraphy*, 20(4): 271—276 (in Chinese with English abstract).
- Chen, D. P., Li, C. A., Bai, D. Y., et al., 2014. Preliminary Discussion on the Quaternary Stratigraphic Framework of Dongting Basin. *Geological Science and Technology Information*, 33(1): 67—73 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y., Yin, H. F., 2003. Study on Historical Environment in Dongting Lake Area. *Earth Science*, 28(2): 214—218 (in Chinese with English abstract).
- Editorial Board of Stratigraphical Lexicon of China, 2000. Stratigraphical Lexicon of China, Quaternary. Geological Publishing House, Beijing, 62 (in Chinese).
- Jing, C. Y., 1982. The Formation and Evolution of Dongting Lake. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2: 52—60 (in Chinese).
- Lai, H. Z., Mo, D. W., 2004. Influences of the Tectonic Subsid-

- ence and the Siltation on Flood Disaster Prevention Situation in the Region of Dongting Lake. *Acta Geographica Sinica*, 59(4): 574—580 (in Chinese with English abstract).
- Lai, H.Z., Mo, D.W., Li, X.B., 2005. Research on the Quaternary Laterite and Paleoclimate in the Dongting Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23 (1): 130 — 137 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.A., 1998. Some Problems on Study of the Quaternary Stratigraphy in China. *Journal of Stratigraphy*, 23(4): 287—290 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.A., 2002. Report of the Flood Area in the Middle Reach of Yangtze River—Division of the Quaternary Strata. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Li, C.A., 2015. The Relationship among Human, Water and Land: Optimizing Function of the Embankment in the Yangtze River. *Earth Science*, 40(2): 261—267 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.A., Zhang, Y.F., Pi, J.G., et al., 2006. Discovery and Significance of Paleo-Lakeside Gravel Layer on Dongting Basin. *Quaternary Sciences*, 26 (3): 491 — 492 (in Chinese).
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocenee-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic  $\delta^{18}\text{O}$  Records. *Paleoceanography*, 20(1): PA1003.
- Liu, C.R., Yin, G.M., Gao, L., et al., 2011. Research Advances in ESR Geochronology of Quaternary Deposits. *Seismology and Geology*, 33 (2): 490 — 498 (in Chinese with English abstract).
- Mao, L.J., Mo, D.W., Yang, J.H., et al., 2008. Rare Earth Element Geochemistry of Reticulate Red Clay around Dongting Lake. *Environmental Chemistry*, 27(2): 222—225 (in Chinese with English abstract).
- Pi, J.G., Liu, C. M., He, J.J., et al., 2002. Environmental and Geological Report of the Dongting Lake in the Middle Reach of Yangtze River. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha, 19—33 (in Chinese).
- Pi, J.G., Zhang, G. L., 1993. Research of Analysis Method of Sedimentary Environment in Dongting Lake Basin. *Hunan Geology*, 12(3): 196—199 (in Chinese with English abstract).
- Pi, J.G., Zhang, G. L., Liang, X., et al., 2001. Preliminary Research on Sedimentary Environment Evolution in Dongting Basin in the Quaternary Period. *Geological Science and Technology Information*, 20(2): 6—10 (in Chinese with English abstract).
- Qiang, X.K., An, Z.S., Song, Y.G., et al., 2010. New Eolian Red Clay Sequence on the Western Chinese Loess Plat-
- eau Linked to Onset of Asian Desertification about 25 Ma Ago. *Science in China (Series D)*, 54(1): 136—144 (in Chinese).
- Reimer, P.J., Baillie, M. G. L., Bard, E., et al., 2009. IntCal09 and Marine09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0—50 000 Years cal BP. *Geochemistry & Geophysics*, 51 (4): 1111—1150.
- Su, C., Mo, D. W., Wang, H., 2001. Evolution of Lake Dongting and Its Flood Disasters. *Research of Soil and Water Conservation*, 8 (2): 52 — 55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C.L., 1992. Formation and Evolution of the Dongting Basin. *Geotectonica et Metallogenesis*, 16(1): 98—99 (in Chinese).
- Xiong, D.Q., 2014. Quaternary Magnetic Stratigraphy and Paleoenvironment in Dongting Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 26 — 36 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. X., 2007. A Study of Depositional Rate in the North China Plain during the Past 40 000 Years Based on  $^{14}\text{C}$  Dating Data from a Large Wealth of Samples. *Quaternary Sciences*, 27(3): 437—443 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. Y., 1986. On the Evolution of the Dongting Lake during Holocene and the Way of Management. *Geographical Research*, 5 (3): 39 — 46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.L., Pi, J.G., Sun, X.L., et al., 1990. Quaternary Report of the Dongting Basin in Hunan Province. Hunan Institute of Geological Prospect, Changsha, 16 — 49 (in Chinese).
- Zhang, J.X., Shen, Z.J., Gu, H.B., et al., 2007. Quaternary Environmental Geochemistry of Dongting Basin. Geological Publishing House, Beijing, 28—44 (in Chinese).
- Zhang, R.Q., Liang, X., Zhang, G. L., et al., 2001. A Preliminary Study of Climate Change in Dongting Lake Area in the Quaternary Period. *Geological Science and Technology Information*, 20(2): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., Cai, S. M., Sun, S. C., 1994. Evolution of Dongting Lake since Holocene. *Journal of Lake Sciences*, 6(1): 13—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.X., Li, C.A., Xu, Y.S., 2014. Sedimentary Characteristics and Sedimentary Environment of the Gravel Bed within Paleo-Yuanjiang River from Dongting Basin. *Geological Science and Technology Information*, 33(1): 85—89 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 柏道远,2010.洞庭盆地第四纪地质环境演化(博士学位论文).武汉:中国地质大学,41—49.
- 柏道远,李长安,周柯军,等,2010a.第四纪洞庭盆地赤山隆起与安乡凹陷升降运动的沉积记录.沉积学报,28(4):645—658.
- 柏道远,李送文,周柯军,等,2010b,1:25万常德市幅构造—沉积地貌类型划分及其对江汉—洞庭盆地第四纪地质与环境研究的启示.中国地质,37(2):280—297.
- 柏道远,王先辉,李长安,等,2011.洞庭盆地第四纪构造演化特征.地质评论,57(2):261—276.
- 湖南省地质矿产局,1988.湖南省区域地质志.北京:地质出版社,263.
- 蔡述明,官子和,孔昭宸,等,1984.从岩相特征和孢粉组合探讨洞庭盆地第四纪自然环境的变迁.海洋与湖沼,15(6):527—539.
- 陈长明,谢丙庚,1996.湖南第四纪地层划分及其下限.地层学杂志,20(4):271—276.
- 陈渡平,李长安,柏道远,等,2014.洞庭盆地第四纪地层格架初拟.地质科技情报,33(1):67—73.
- 杜耘,殷鸿福,2003.洞庭湖历史时期环境研究.地球科学,28(2):214—218.
- 《中国地层典》编委会,2000.中国地层典——第四系.北京:地质出版社,62.
- 景存义,1982.洞庭湖的形成与演变.南京师院学报(自然科学版),2:52—60.
- 来红州,莫多闻,2004.构造沉降和泥沙淤积对洞庭湖区防洪的影响.地理学报,59(4):574—580.
- 来红州,莫多闻,李新坡,2005.洞庭盆地第四纪红土层及古气候研究.沉积学报,23(1):130—137.
- 李长安,1999.中国第四纪地层研究中的若干问题.地层学杂志,23(4):287—290.
- 李长安,2002.长江中游水患区报告——第四纪地层的划分.武汉:中国地质大学.
- 李长安,2015.基于“人—水—地和谐”的长江堤防功能.地球科学,40(2):261—267.
- 李长安,张玉芬,皮建高,等,2006.洞庭湖古湖滨砾石层的发现及意义.第四纪研究,26(3):491—492.
- 刘春茹,尹功明,高璐,等,2011.第四纪沉积物ESR年代学研究进展.地震地质,33(2):490—498.
- 毛龙江,莫多闻,杨兢红,等,2008.环洞庭湖地区网纹红土中稀土元素的地球化学特征.环境化学,27(2):222—225.
- 皮建高,刘长明,何建军,等,2002.长江中游洞庭湖水患区环境地质调查评价报告.长沙:湖南省地质调查院,19—33.
- 皮建高,张国梁,1993.洞庭湖盆地沉积环境分析方法探索.湖南地质,12(3):196—199.
- 皮建高,张国梁,梁杏,等,2001.洞庭盆地第四纪沉积环境演化的初步分析.地质科技情报,20(2):6—10.
- 强小科,安芷生,宋友桂,等,2010.晚渐新世以来中国黄土高原风成红粘土序列的发现:亚洲内陆干旱化起源的新记录.中国科学(D辑),40(11):1479—1488.
- 苏成,莫多闻,王辉,2001.洞庭湖的形成、演变与洪涝灾害.水土保持研究,8(2):52—55.
- 王春林,1992.洞庭盆地的形成和演化.大地构造与成矿学,16(1):98—99.
- 熊德强,2014.洞庭盆地第四纪磁性地层与古环境(硕士学位论文).武汉:中国地质大学,26—36.
- 许炯心,2007.基于大样本<sup>14</sup>C测年资料的华北平原沉积速率研究.第四纪研究,27(3):437—443.
- 杨达源,1986.洞庭湖的演变及其整治.地理研究,5(3):39—46.
- 张国梁,皮建高,孙锡良,等,1990.湖南省洞庭盆地第四纪地层研究报告.长沙:湖南省地质勘查局,16—49.
- 张建新,申志军,顾海滨,等,2007.洞庭湖区第四纪环境地球化学.北京:地质出版社,28—44.
- 张人权,梁杏,张国梁,等,2001.洞庭湖区第四纪气候变化的初步探讨.地质科技情报,20(2):1—5.
- 张晓阳,蔡述明,孙顺才,1994.全新世以来洞庭湖的演变.湖泊科学,6(1):13—21.
- 赵举兴,李长安,许应石,2014.洞庭盆地古沅江砾石层的沉积特征及沉积环境.地质科技情报,33(1):85—89.