

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2018.02.001

洞庭盆地安乡凹陷下更新统层序地层 及其对构造活动的响应

魏方辉, 杨少辉, 赵伟, 刘庚寅, 罗来, 曹顺红, 赵睿成

WEI Fang-Hui, YANG Shao-Hui, ZHAO Wei, LIU Geng-Yin, LUO Lai, CAO Shun-Hong, ZHAO Rui-Cheng

(湖南省地质调查院, 长沙 410116)

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China)

摘要:通过地表调查和钻孔资料,运用高分辨率层序地层学理论及方法,识别出了区域不整合面、岩性岩相突变界面、冲刷面、相序间断面、高频层序叠加样式转换面、湖泛面等几种层序界面,并按基准面旋回原理将第四纪洞庭盆地安乡凹陷早更新世华田组和汨罗组划分为2个长期、5个中期和25个短期旋回层序;短期基准面旋回细分为向上变深非对称型(A型)、向上变浅非对称型(B型)和对称型(C型)3种基本类型;整个下更新统反映出—个大的湖盆从发育到消亡,然后暴露风化剥蚀,以及之后的缓慢沉降到抬升过程。认为安乡凹陷早更新世基准面升降与沉积动力学(即沉积物的剥蚀、搬运和堆积过程)具有很好的吻合性,基准面旋回以自旋回为主,还受到了构造作用的影响;盆地沉积与构造分析表明,早更新世洞庭盆地安乡凹陷经历了伸展—挤压—弱挤压—挤压—挤压抬升的构造演化过程,其深层次的构造动力学机制可能与深部地幔上隆炙烤地壳、下地壳拆沉和物质逃逸有关。

关键词:洞庭盆地;安乡凹陷;下更新统;高分辨率层序地层;基准面旋回;构造活动

中图分类号:P534.63;P511

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2018)02-093-014

Wei F H, Yang S H, Zhao W, Liu G Y, Luo L, Cao S H, Zhao R C. Lower pleistocene sequence stratigraphy in the Anxiang depression of Dongting basin and its response to structural movement. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(2):93-106.

Abstract: Through the field survey and drilling data, as well as the application of the theory and method of high resolution sequence stratigraphy, several sequence boundaries were reorganized in Anxiang depression of Dongting basin, such as the regional unconformity surface, lithology and lithofacies transition surface, erosion scouring structure, phase interval, high-frequency sequence superimposed transformation surface and flooding surface. Based on the principle of base-level cycle, we recognized two long-term, five middle-term and twenty five short-term cyclic sequences from Early pleistocene Huatian Formation and Miluo Formation in Anxiang depression of Dongting basin. Short-term cyclic sequences were detailedly divided into deepening upward nonsymmetric type (type A), shallowing upward nonsymmetric type (type B) and symmetric type (type C). The lower Pleistocene sequence was show up as presses of a big lake basin from development to die, then exposed to weathering and denudation, and then slowly settling to the lifting process. Researches also show that the rising and falling of base-level was consistent with the sedimentary dynamics (sediment erosion, transportation and accumulation process), which was controlled by the spin cycle and tectonism in the early Pleistocene. Ana-

收稿日期:2017-8-14;修回日期:2018-5-7

基金项目:中国地质调查局湘西-鄂西成矿带神农架-花垣地区地质矿产调查二级项目(No.DD20160029)资助。

第一作者:魏方辉(1986—)男,工程师,主要从事区域地质调查与研究;E-mail:weifh2010@163.com。

通讯作者:杨少辉(1984—)男,工程师,主要从事第四纪地质调查与研究;E-mail:191235295@qq.com。

lyzing the tectonic sedimentary dynamics of the early Pleistocene basin in Anxiang depression, it can be considered that the tectonic evolution of the Quaternary Anxiang basin experienced extension fault depression, extrusion uplift, weak extrusion sag and extrusion uplift. The deep-level tectonic dynamics mechanism may be related to the lower crust baked by the deeper upper mantle, the lower crust delamination and material escape.

Keywords: Dongting basin; Anxiang depression; Early Pleistocene; high resolution sequence stratigraphy; base-level cycle; structural movement

层序地层学已形成多种理论体系^[1-6],对于它们之间的差异与相似性前人已经作了大量的研究工作,研究表明经典的层序地层学在海相环境中得到很好的应用,但在陆相环境中具有一定的局限性,不完全适合中国陆相地层的层序地层学研究^[1-2]。以Cross为代表的高分辨率层序地层学理论,其重点强调砂体成因、沉积序列的组合特征随可容空间的变化规律,研究地层基准面变化过程中A/S(即可容纳空间变化率/沉积物供速率)值的变化^[2-3],这对我国陆相高精度地层划分具有很好的应用效果^[4-6]。Cross^[3]把基准面解释为,它是迫使地表上下移动到某一个位置的能量,在这个位置上地形梯度、沉积物供应和可容纳空间是平衡的面,也可进一步描述成在其变化期间可容纳空间变化与沉积物供给速率比值的变化。当基准面位于地表(沉积界面)之下并进一步下降时,侵蚀作用的潜在速度增加,当基准面位于地表(沉积界面)之上并不断上升时,沉积作用的潜在速度增加,当基准面和地表(沉积界面)重叠或平行时,所在位置不沉积,也不剥蚀。

洞庭盆地是长江中游最大的第四纪沉积盆地之一。以雪峰隆起一线为南界,北面抵华容次级隆起与江汉盆地相隔,西临武陵隆起,东面为幕阜山隆起,整体外貌呈现向南突出的不规则菱形(图1)。洞庭盆地沉积体系主要是在构造沉降的基础上,由湘江、资水、沅江、澧水四大水系以及长江的沉积物充填而成^[7]。关于第四纪洞庭盆地地质特征的研究由来已久,但受工作程度与认识角度的限制,对有关问题的认识尚存在一定分歧^[8],其中最突出的是在盆地构造性质及构造活动特征方面。归纳起来有以下三种认识和观点:其一,第四纪洞庭盆地属于断陷盆地^[9-10];其二,认为是凹陷盆地^[11-12];其三为上述两种观点的折中认识,认为早、中更新世为断陷盆地,晚更新世以来为坳陷盆地^[13-15],或认为江汉洞庭盆地第四纪以来存在非对称扩张,其成因

主要与北西、北东向断裂的走滑拉分或走滑挤压活动有关^[15]。柏道远等^[16-18]通过详细的地质调查和分析,认为洞庭盆地升降活动的时空演化、横向分异及构造机制等颇为复杂,其中最为突出的特征是第四纪早期(早更新世—中更新世中期)和晚期(中更新世晚期—全新世)盆地分别具断陷和坳陷性质,其中早更新世—中更新世中期洞庭盆地处于断陷阶段;中更新世晚期以来洞庭盆地处于坳陷阶段,中更新世晚期洞庭盆地整体抬升并遭受剥蚀,在盆地东缘和西缘产生倾向盆地的构造掀斜,局部第四系变形形成褶皱;晚更新世—全新世洞庭盆地主体产生坳陷沉降并接受沉积。虽然前人对洞庭盆地进行了大量调查和研究,但主要侧重于对盆地属性和构造演化进行分析和探讨,对盆地充填序列和高精度地层层序划分还未进行细致的工作和研究。

笔者以高分辨率层序地层学理论为基础,充分吸收前人的研究成果,在对研究区5口取心井详细岩心观察和描述的基础上,结合区域地质资料,综合运用钻井、录井、地质剖面资料,对洞庭盆地安乡凹陷下更新统层序地层作进一步深化研究,建立旋回地层格架,并分析格架内沉积相演化规律,探讨安乡凹陷及其西缘地区早更新世构造-沉积特征与环境演化,为后续洞庭盆地的基础地质、水文地质等调查研究提供参考资料。

1 地质背景

第四纪洞庭盆地及周缘不同地区地壳升降运动特征存在差异,导致第四纪地层厚度、层序、出露情况等存在显著的横向变化^[19]。第四纪洞庭盆地由澧县凹陷、临澧凹陷、太阳山(次级)隆起、安乡凹陷、赤山(次级)隆起、沅江凹陷等次级构造单元组成(图1),西、南、东三面分别为武陵隆起、雪峰隆起和幕阜山隆起,北为江汉盆地。洞庭盆地与江汉

盆地在西段相接,东段以华容(次级)隆起相隔^[20]。隆起区地势一般显著高于相邻的凹陷区,前者多为低山丘陵与岗状平原,后者多为波状平原与低平原。第四纪洞庭盆地隆-凹构造格局及各次级凹陷的构造活动主要受第四纪正断裂或挤压凹陷体制控制,盆地中心总体为沉降,而周缘隆起区及盆地内部的局部隆起总体为抬升,上述运动差异使凹陷内部和周缘抬升区(包括赤山隆起)的第四纪沉积作用及地层发育状况具显著差异。抬升区第四纪地

层主要分布于洞庭盆地周缘丘岗、山地,多有天然或人工第四系露头剖面,并常见前第四纪基岩或基座出露;地层厚度一般不大,各时代沉积常组成基座阶地、埋藏阶地或镶嵌阶地;成因类型以冲积和冲洪积为主,次为残坡积,局部山麓或沟谷发育洪积,横向上分布不均匀,且变化较大。凹陷区第四纪地层主要分布于全新世湖冲积平原及部分盆缘低缓丘岗区,一般无露头剖面 and 基岩出露,仅依靠第四纪钻孔资料进行地层划分和对比;凹陷区不同时

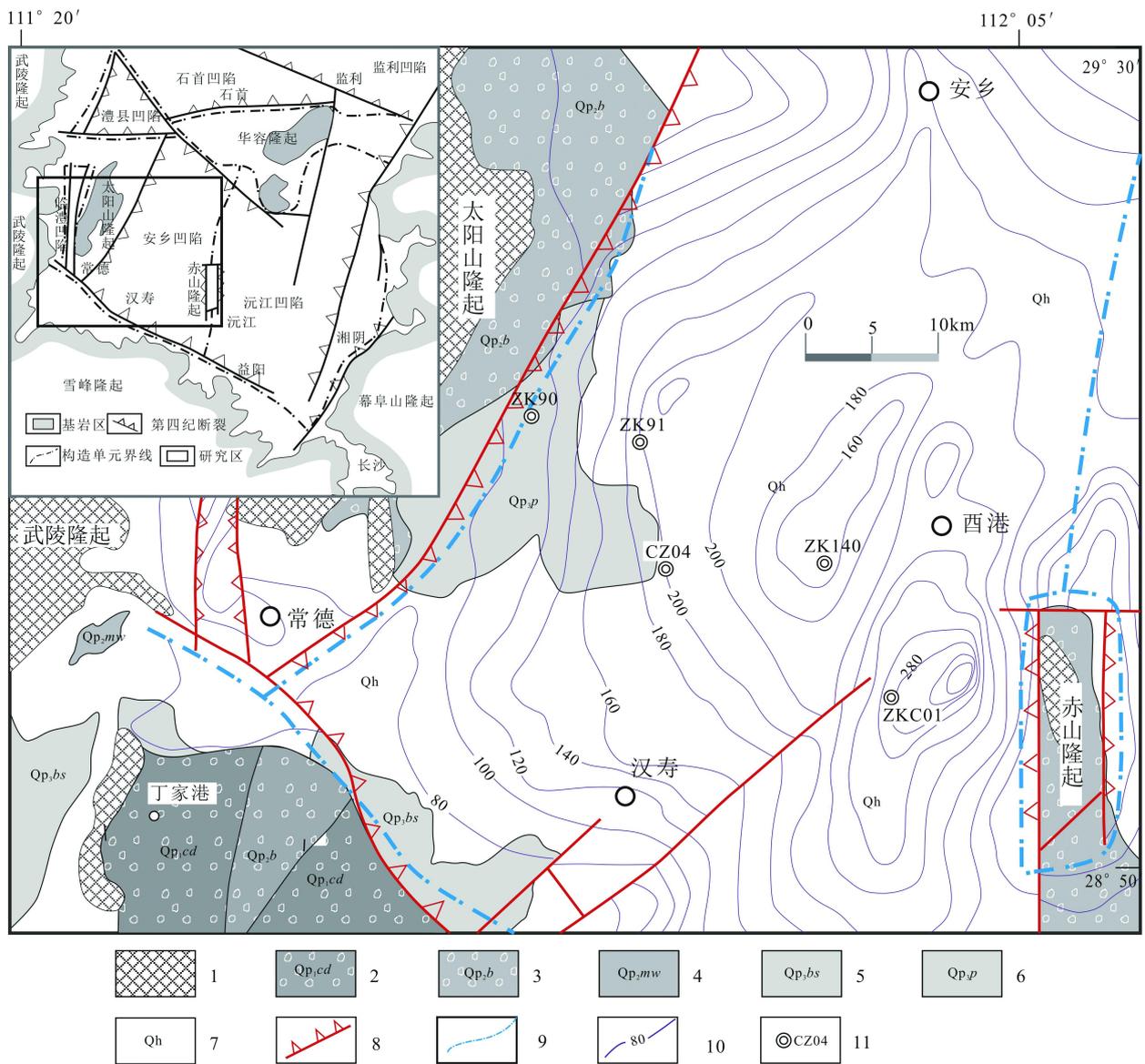


图1安乡凹陷及周边第四纪地质地貌图(据引文[19]略修改)

Fig. 1 Quaternary Geological geomorphologic Sketch of Anxiang Sag and Its Periphery

1-前第四纪基岩;2-常德组砾石层;3-白沙井组砾石层;4-马王堆组;5-白水江组;6-坡头组;7-全新统;8-控盆正断裂,齿向表示下降盘;9-第四纪构造单元分界;10-第四纪沉积等厚线及厚度值;11-第四系钻孔位置及编号。

代地层在垂向上自下而上叠置,地层厚度较大^[19]。根据研究区地层发育情况,以前人资料^[20-22]为基础,结合本次最新调查成果和进展,分别建立了洞庭盆地覆盖区(或凹陷区)和露头区(或抬升区)地层系统,地层划分对比情况见表1。

2 钻孔地质特征

前人于凹陷内施工了大量钻孔(本文所采用的部分钻孔资料主要来源于湖南省地勘局水文二队),且1:25万常德幅区域地质调查过程中于目平湖西侧两护村施工了穿透第四系的ZKC01孔,进行了详细的剖面编录与大量的样品分析,为全面认识凹陷内沉积层序与空间变化提供了条件。本次调查于常德市鼎城区韩公渡罗家铺村新施工了第四系钻孔,其目的是揭穿第四系,查明安乡凹陷西部第四系空间展布(包括厚度、埋深、底界高程等),划分第四纪地层单元,分析第四系沉积环境与盆地充填序列,并对安乡凹陷第四纪沉积进行详细的研究;同时采取了古地磁、沉积物年龄(ESR和OSL)、

孢粉、磁化率、地球化学、砂泥质沉积物粒度等样品,通过分析测试,提取出有关洞庭盆地第四纪气候与环境演化的新信息。

2.1 安乡凹陷西部 CZ04 孔地质特征

CZ04孔位于安乡凹陷西部、常德市鼎城区韩公渡罗家铺村,公里网坐标为X=3221352.2,Y=19594411.5,地表高程为海拔32.0m。钻孔深为204.68m,第四纪松散沉积层厚为201.63m;钻孔直径为110mm,每回次进尺1~3m,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91.07%。CZ04孔沉积连续,沉积序列完整清晰,由266个自然沉积层组成,其中第四系松散沉积物可归纳划分为59个岩性层。总体上看,从下更新统沉积物的颜色和岩性组合可将CZ04孔下更新统分为2段(图2),下段包括2-11等10个岩性层,颜色以青灰色杂灰黄色、绛红色为主要特征,沉积物粒度较细,多为砂层及粉砂质粘土层,底部为砂砾石夹粗砂层;上段包括12-31等20个岩性层,颜色以灰色、深灰色为主,沉积物粒度较粗,以粗砂层为主,

表1 洞庭盆地及周缘第四纪地层划分对比

Table1 Subdivision and Correlation of the Quaternary Strata in Dongting Basin and Its Adjacent Areas

年代地层		抬升区		凹陷区	
全新统	全新统	冲积层	由现代河流的冲积、冲洪积砂砾石及上部之砂质粘土组成。	冲湖积层	冲湖积形成的粉砂、粘土质粉砂,表现为低洼湖泊和河流沉积。
更新统	上更新统	白水江组	上部:灰黄色粘土; 下部:砾石层,砂砾石层;	坡头组	主要为粘土、含粉砂质粘土,表现为漫滩或洼地湖泊沉积。
	中更新统	马王堆组	上部:棕红色网纹粘土、粘土; 下部:网纹化粘土质砾石层。	洞庭湖组	整体为一套以砂砾沉积夹粘土、粉砂的冲洪积沉积,由三个由粗变细的旋回组成。
		白沙井组	砾石层夹透镜状砂层,常与常德组成镶嵌阶地接触。		
下更新统	常德组	上部为紫红、灰褐、灰白、黄白色等杂色粘土,含少量砂质。 下部为棕黄色砾石层、砂砾石层,含铁质胶结层,砂为中粗砂,呈透镜状,该层以砂砾石为主,砾石成分主要为脉石英、硅质岩、变质砂岩,结构紧密,砾径一般2~3cm,个别5~8cm,砾石磨圆度以圆、次圆为主;局部具斜交层理。	汨罗组	与华田组假整合接触,可分为三个岩性段;岩性为灰色、灰白色为主夹有棕黄、棕灰色的粗砂层、砂砾层和粘土质砂层、砂质粘土层及粘土层,构成多个向上变细的韵律层。整体为一套辫状河和辫状河三角洲沉积。	
				华田组	下部为灰色、灰黄色砂砾、砂沉积;上部沉积物由砂-粉砂(含粉砂质)与杂色粘土组成多个下粗上细的韵律结构层。该组杂色粘土及少量含粉砂质粘土为本段主体,颜色有青灰、黄白、黄绿、灰绿、桔黄、棕黄、灰黄、浅黄、绛红色等,不同颜色的粘土常相间、交错而形成条带状、团块状、晕状等构造。

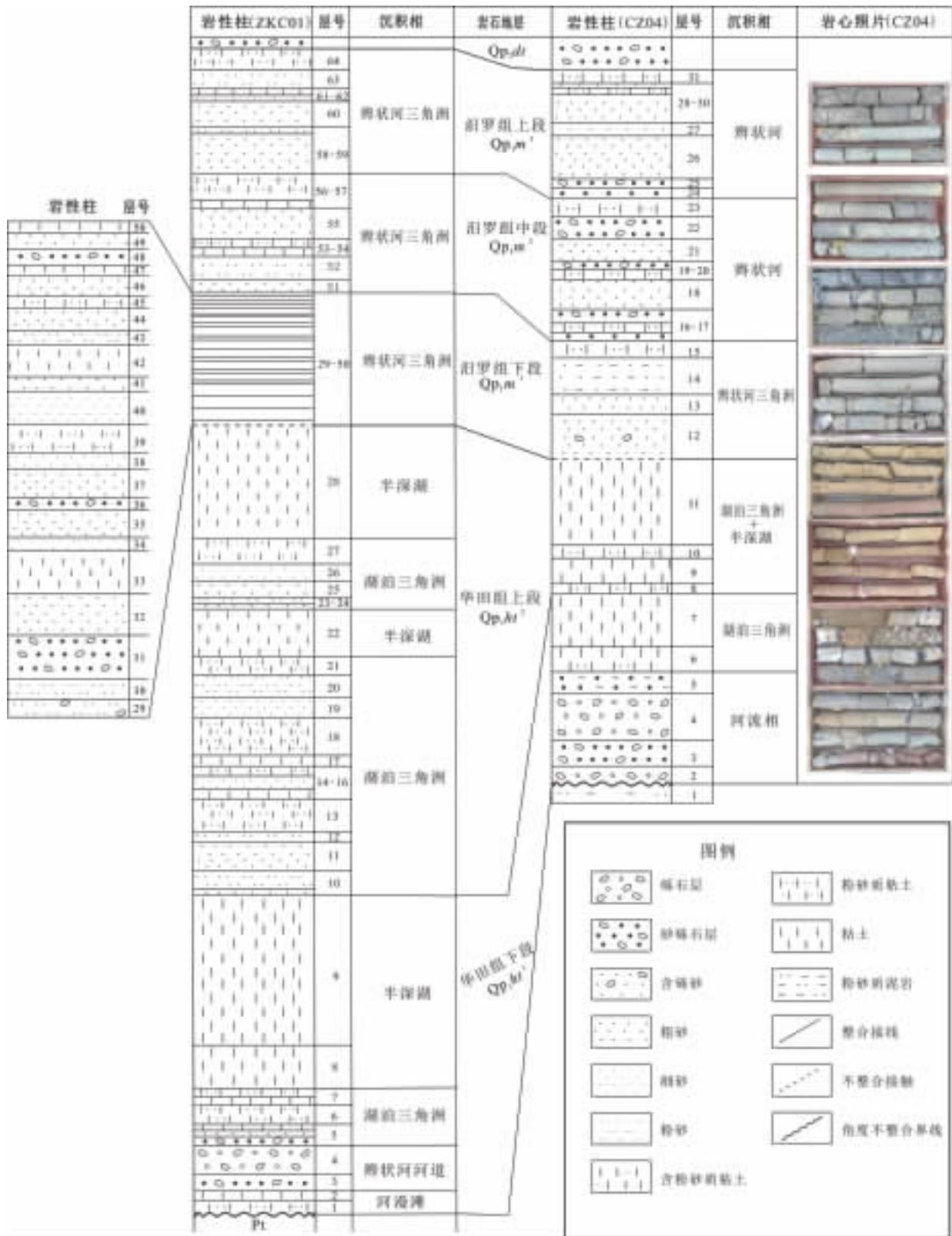


图2 ZKC01和CZ04钻孔下更新统地质特征

Fig. 2 Geological characteristics of Lower Pleistocene from ZKC01 borehole and CZ04 borehole

夹含砾粗砂层和少量浅灰色、灰色粘土层(图2)。

CZ04孔下更新统岩石地层单位发育齐全,各标志层清晰,根据岩性分层、沉积旋回及选定的覆盖区地层划分方案,将CZ04孔下更新统自下而上划分为华田组($Q_{p,ht}$)、汨罗组($Q_{p,ml}$)等2个组级地层单位,并分别划分为2个和3个段级地层单位。

2.2 安乡凹陷东部 ZKC01 孔地质特征

ZKC01孔位于安乡凹陷东部、汉寿县西港镇两护村,公里网坐标为 $X=3212085, Y=19616411$,地表高程为海拔26.0 m。钻孔深为312.63 m,其中第四纪松散沉积层厚为294.26 m;钻孔直径为110 mm,每次进尺1~3 m,个别含砾粗砂层与砾石层单次取心率为75%~85%,其余回次单次取心率均大于85%,钻孔平均取心率为80%。ZKC01孔沉积连续,沉积序列完整清晰,由222个自然沉积层组成,其中下更新统松散沉积物可归纳划分为64个岩性层。从沉积物的颜色和沉积物粒度可将ZKC01下更新统分为2段(图2);下段包括1~28等28个岩性层,以青灰色、灰黄色、绛红色细粒的砂层、粉砂质粘土层为主,底部为砾石层及砂砾石层,偶见细砾石层;上段包括29~64等36个岩性层,颜色以灰色、深灰色为主,沉积物粒度较粗,岩性以粗砂、含砾粗砂层夹粉砂质粘土为特征(图2)。ZKC01孔下更新统上述沉积层序可与CZ04孔进行较好的对比,其下段、上段分别划分为华田组($Q_{p,ht}$)和汨罗组($Q_{p,ml}$)。

3 高分辨率层序地层学特征

高分辨率层序地层学利用地层基准面升降旋回和可容纳空间变化与沉积物供给量速率之间的比值划分层序,其理论技术既可应用于油气田勘探阶段长时间尺度的层序单元划分与等时对比,也适合开发阶段短时间尺度的砂层组、砂层和单砂体层序划分与等时对比,提高了所对比地层单元的等时性精度^[23-24],尤其对新生代以来的陆相盆地层序划分、建立地层格架具有重要的指导作用。安乡凹陷下更新统为陆相沉积地层,发育了一套完整的河流-三角洲-湖泊沉积-河流沉积体系^[19],但尚未对其进行层序划分和级别的厘定。在层序地层研究过程中,存在着客观地质事实的识别和主观地质认识

的总结两方面^[23],岩性、岩相、相序、界面等的识别是客观的,而对层序级别的认识是主观的,这充分体现了层序地层学工作中的客观存在性与主观能动性的有机统一。

3.1 层序划分依据及层序界面

层序界面的识别是层序地层研究的基础和关键。层序界面主要包括三种类型:第一种是沉积间断形成的不整合面;第二种是基准面从下降到上升的转换面;第三种是基准面从上升到下降的转换面,即湖泛面。湖泛面由于其识别上的优势往往更具有等时对比意义。通过对研究区以及周边野外露头剖面的观察,结合盆地内的钻井资料认为安乡凹陷更新统层序识别过程中关键界面类型主要包括:区域不整合面(图3-a)、岩性岩相突变界面(图3-b、c)、冲刷面(图3-d)、相序间断面、高频层序叠加样式转换面、湖泛面。

3.2 层序地层划分方案

精细的岩心观察与分析能够提取各种典型沉积相标志信息,如岩石颜色、岩石类型、碎屑颗粒结构、沉积构造等,从而成为短期基准面旋回识别基础。本次研究主要应用ZKC01孔的岩心、地质编录等资料,实现了洞庭盆地安乡凹陷下更新统层序地层的识别划分,自下而上划分出2个长期基准面旋回,进一步细分为5个中期基准面旋回,以及25个短期基准面旋回(表2,图4)。

3.3 各中期旋回内短期旋回类型及层序地层叠加样式

在高分辨率层序地层分析中,最具等时对比意义的是中期旋回,由于中期旋回由一系列具有进

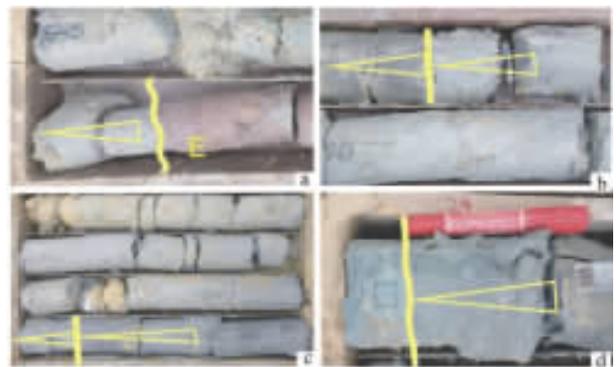


图3 层序界面类型照片

Fig. 3 The photograph of sequence boundary type
a—区域不整合面;b、c—岩性岩相突变界面;d—冲刷面;
三角示向上变细的旋回。

表2 安乡凹陷下更新统层序地层划分

Table 2 Sequence stratigraphic division of lower Pleistocene series in Anxiang depression

长期编号	旋回类型	中期编号	旋回类型	短期旋回编号	岩石地层单位
LSC2	上升	MSC5	缓慢上升	22-25	汨罗组上段(Qp ₁ ml ³)
		MSC4	缓慢上升、快速后下降	13-21	汨罗组下段(Qp ₁ ml ¹)、 汨罗组中段(Qp ₁ ml ²)
		MSC3	缓慢上升、快速下降	11-12	
LSC1	上升为主	MSC2	缓慢上升、快速下降	7-10	华田组上段(Qp ₁ ht ²)
		MSC1	缓慢上升、加速上升、快速下降	1-6	华田组下段(Qp ₁ ht ¹)

积、加积和退积叠加样式、加积和退积叠加样式的短期旋回叠加组成,因而了解短期旋回的结构类型、叠加样式及其在中期旋回过程中的分布规律是至关重要的。研究表明,在不考虑构造沉降引起可容纳空间变化的条件下,中期基准面旋回的变化轨迹是根据基准面的运动随时间的变化而假想出来的一条正(余)弦曲线 $A(t)$,基准面旋回内可容纳空间的变化率为可容纳空间 $A(t)$ 的导数,可用 $A'(t)$ 表示,与基准面的升降变化率是一致的;同时,沉积物供给量随时间的变化与基准面变化正好是反向的,也是一条正(余)弦曲线 $S(t)$,可用 $S'(t)$ 表示沉积物供给速率^[25-26](图 5、图 6)。因此,中期基准面在变化过程中必然会经过以下时间节点,分别为 T1(初始上升点, $A' \ll S'$)、T2($A' = S'$)、T3($A' = 0$, 基准面最高, 剩余可容纳空间 AR 最大)、T4(AR=0)和 T5(基准面回到最低点),在上述节点之间,短期旋回类型及层序地层叠加样式存在较大差异。

在 T1-T2 期间,基准面从最低点缓慢上升, $A' < S'$, 很小或较小的可容纳空间无法保留大量沉积物的供给,大量沉积物将被搬运到较下游的地方沉积^[24], 剩余可容纳空间一直为零。该阶段的短期旋回表现为冲刷面+向上变“深”组成的非对称旋回(A型),层序地层为单一岩性组成的、且具非对称型短期旋回构成进积到加积的叠加样式。在 T2 时间节点及附近, $A' = S'$, 基准面上升时新增的可容纳空间正好被供给的沉积物所充填,沉积物得到较好的保存,形成数个以整合面(或弱冲刷面)+向上变“深”组成的非对称旋回(A型),层序地层表现为几种岩性组成

的、且具非对称型旋回的加积叠加样式。

在 T2-T3 期间,为中期基准面上升的中晚期, $A' > S'$, 沉积物在任一短期基准面的上升和下降期间均会完全沉积;短期旋回表现为整合面+向上变“深”的非对称旋回(A型)和整合面+向上变“深”复变“浅”组成的对称旋回(C型),层序地层为由非对称旋回和对称型旋回构成退积叠加样式。T3 时间节点及附近, $A' = 0$, 基准面最高, 剩余可容纳空间 AR 最大,此时物源供给量最小,理论上会形成数个整合的、具有对称型旋回的加积层序或表现为饥饿沉积。

在 T3-T4 期间,为中期基准面下降早期, $A' < 0$, 剩余可容纳空间逐渐被沉积物所充填,在剩余可容纳空间减少至零之前,短期旋回表现为向上变“浅”为主的对称旋回(C型)和非对称旋回(B型),相互叠加形成加积和进积堆叠样式。T4 时间节点及附近,基准面与沉积界面重叠,剩余可容纳空间为零,沉积物无法停留而产生过路不沉积。T4-T5 期间,中期基准面不断下降,基准面越过沉积界面继续下降,将会对原有沉积物进行不断地下切侵蚀。

从上述模型和理论可见,研究短期旋回类型及其相互之间的叠加样式有利于判断短期旋回在中期旋回的位置、细化中期旋回变化过程及规律。需要指出的是,地质过程是复杂多变的,钻孔岩心实际表现出来的短期旋回及其叠加样式远比理论和模型复杂,但在一个中期基准面旋回过程中,钻孔岩心也大致会遵循以下规律,即短期旋回类型经历“A型—C型—B型”的变化,层序地层表现为“进

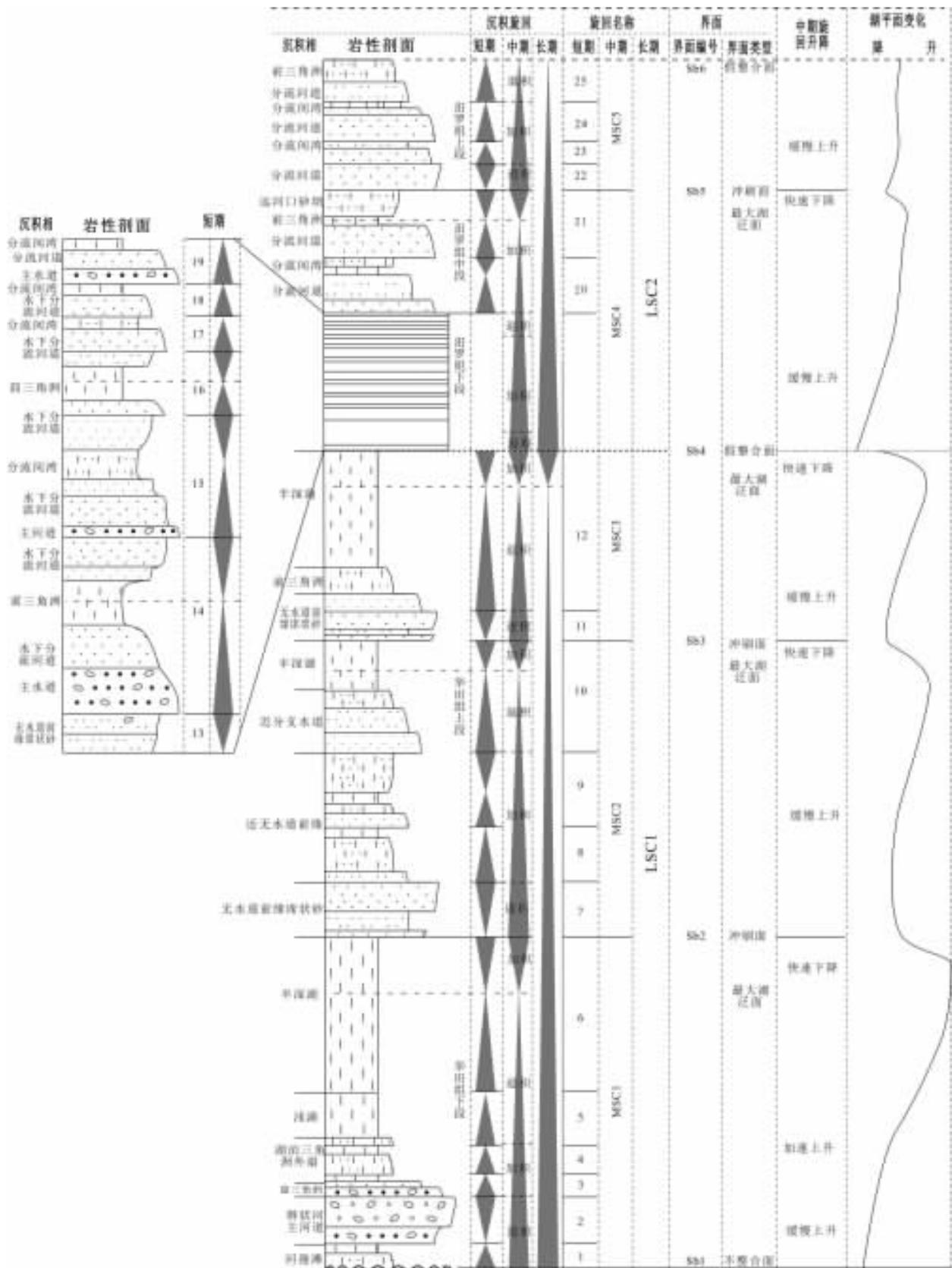


图4 洞庭盆地安乡凹陷ZKC01下更新统基准面旋回层序划分

Fig. 4 Base-level cycle sequence of lower Pleistocene series in Anxiang depression, Dongting basin

积—加积—退积—加积—进积”的层序叠加规律。综合研究区内 5 口单井(ZK90、ZK91、CZ04、ZK140 和 ZKC01)的层序地层格架(图 7),结合上述理论和模型总结了安乡凹陷下更新统的几种短期基准面旋回:其一是以只发育基准面上升期沉积的非对称型旋回(A 型),一般发生在中期基准面上升的早期和中期;其二是较完整记录了基准面上升和下降期沉积的近对称型旋回(C 型),一般发育在中期基准面上升的中晚期和下降的初期;其三是只发育下降半旋回沉积的非对称型旋回(B 型),一般发育在中期基准面上升初期和下降早期。

3.4 各中期旋回分布演化特征

中期基准面旋回具有较好的等时对比意义,在中期基准面旋回的不同位置沉积体结构、叠加样式和沉积微相分布也存在明显差异,因此,中期基准面旋回为高分辨率层序地层研究的重点之一。本次研究将洞庭盆地安乡凹陷下更新统划分了 5 个中期旋回(图 4)

MSC1 旋回以区域不整合面 SB1 为底界面,位于长期基准面旋回 LSC1 下部,中期基准面升降过程为先缓慢上升到快速上升,最后为快速下降,形成以向上变“深”为主的非完全对称旋回。地层层序表现为“进积→加积→退积→加积”的层序叠加,缺少理论上的最后一个进积堆积,可能为后期基准面下降侵蚀作用有关。基准面上升初期,沉积界面平坦,以季节性河流漫滩沉积为主,之后沉积物供给速率(S')增大产生强烈进积,沉积物以辫状河道充填的面状砂体为主;基准面上升中期, A' 与 S' 大小

基本一致,在湖泊三角洲外扇沉积了具有加积堆叠样式的粉砂质粘土和粘土;基准面上升晚期,可容纳空间最大,物源供给量较小,形成数个整合的、具有向上变“深”的非对称旋回组成退积层序以及由对称型旋回构成的加积层序。

MSC2 旋回为中期基准面缓慢上升和快速下降的非完全对称旋回(图 4);层序地层表现为“进积→加积→退积→加积”,缺少理论上的最后一个进积堆积。基准面上升早期,发育具有进积叠加样式的湖泊三角洲无水道前缘席状砂,随着中期基准面的上升,近无水道前缘席状砂开始发育,近分流水道沉积物增多,水道/漫流比值减小,沉积序列表现为逐渐变细的趋势,地层之间为垂向加积为主。基准面上升晚期,剩余容纳空间逐渐增大,发育半深湖沉积,地层之间以退积和加积形式相互叠置。

MSC3 旋回为中期基准面缓慢上升到快速下降非完全对称旋回(图 4);层序地层表现为“进积→退积→加积”,缺少理论上的第一个加积层和最后一个进积堆积层,可能为区域抬升剥蚀有关。基准面上升早期有一次区域上的沉积物补给,使水道/漫流比值增大,产生小规模的进积沉积,发育无水道前缘席状砂;随着基准面缓慢上升,可容空间增大,发育湖泊三角洲外扇和半深湖沉积,沉积物之间以退积叠置为主;最后中期基准面加速下降,产生加积和过路不沉积。SB4 为湖盆快速消亡已尽之后的风化剥蚀阶段。

MSC4 旋回位于长期基准面旋回 LSC2 早期,底界面为区域不整合面 SB4,顶界面为冲刷侵蚀

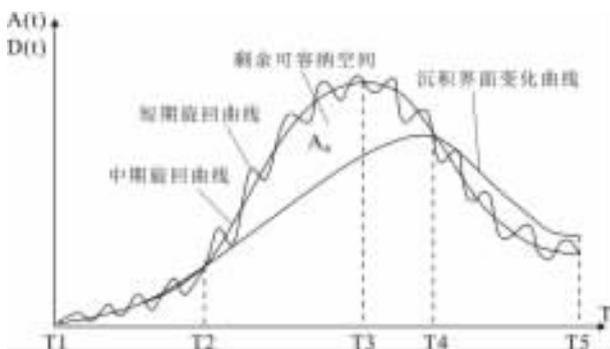


图5 可容纳空间变化率与沉积物供给速率的关系图
(据文献[25]修改)

Fig. 5 The relationship between the curve of the base-level cycle change and the depositional interface
(According to Ref. [25] changes)

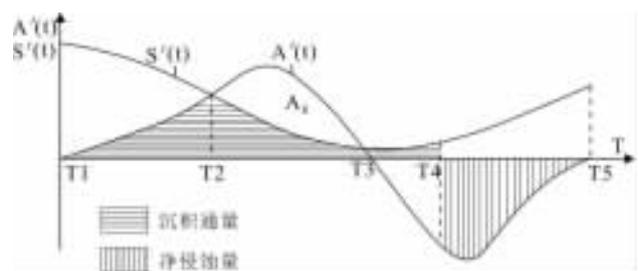


图6 同一中期基准面旋回内 $A'(t)$ 或 $S'(t)$ 与沉积通量图解
(据文献[25]修改)

Fig. 6 The relationship between the rate of accommodation space variation and the sedimentary alimentation
(According to Ref. [25] changes)

面,为中期基准面快速上升、缓慢上升到快速下降非完全对称旋回(图4);层序地层表现为“进积→加积→退积→加积”的层序叠加,缺少理论上的最后一个进积堆积,可能为后期基准面下降侵蚀有关。基准面上升初期有一次区域上的物源补给,并向盆内产生进积,形成了无水道前缘席状砂,砂体连通性较好,反映了低可容纳空间的沉积特征;基准面上升早期,A'与S'大小基本一致,发育3个由C型对称短旋回构成的加积堆积,反映可容纳空间的快速增大,辫状河三角洲前缘之主水道、分流河道和分流间湾微相往复变化,可能与构造作用引起的可容纳空间变化有关;基准面上升中晚期,可容纳空间较大,发育以向上变“深”为主的非对称短旋回和非完全对称旋回,沉积物之间为退积和垂向加积分布为主(图4),沉积物展布先退积后加积,并形成一系列辫状河水下分流河道、分流间湾夹主水道沉积体系。

MSC5旋回位于长期基准面旋回LSC2晚期,底界面为冲刷侵蚀面,顶界面为区域不整合面SB6,为中期基准面缓慢上升的非对称旋回(图4);层序地层表现为“进积→加积→退积”的层序叠加,缺少理论上最后的加积和进积堆积,可能为区域抬升侵蚀有关。旋回初期有一次沉积物补给,并向盆地内进积堆积;随着基准面的上升,发育3个向上变细的短期半旋回,上部的沉积物得到较好保持,反映高-中等容纳空间沉积。沉积物展布以加积和退积叠置样式为主,形成一系列辫状河分支河道、河流间湾和前三角洲沉积体系,表明水体不断加深;该旋回中缺少中期基准面下降过程形成的沉积物,可能在基准面下降期或后期的构造抬升过程中剥蚀。

3.5 高分辨率层序地层对比格架的建立

在识别出研究层段短期、中期、长期旋回的基础上,以SB1、SB4和SB6为区域标志面,以中期旋回作为建立地层格架与层序对比的基础,以中期旋

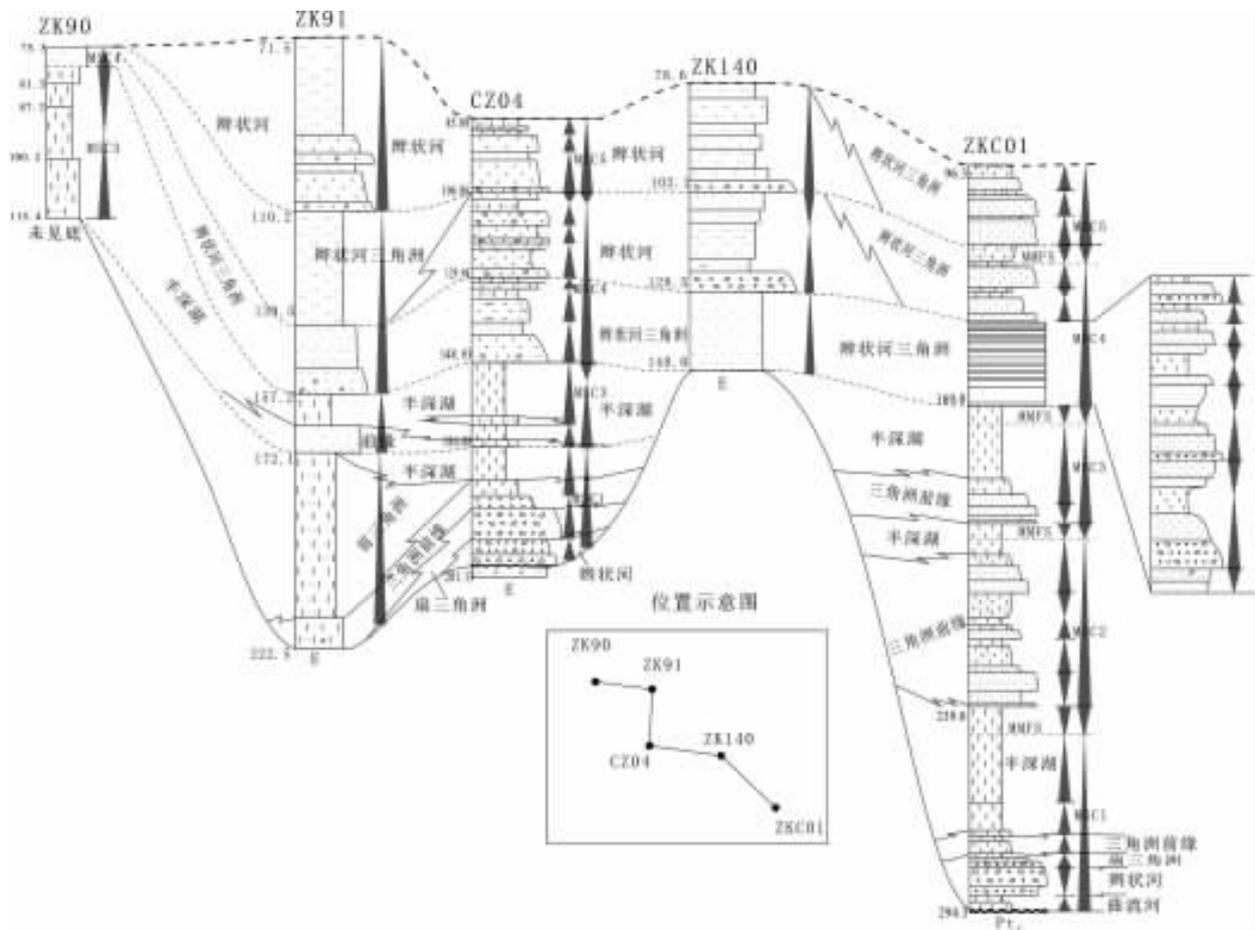


图7 安乡凹陷北西-南东向第四纪层序地层对比格架

Fig. 7 The NW-SE sequence stratigraphy correlation framework of Anxiang depression

回中最大湖泛面为等时对比的标志,建立了研究区下更新统高分辨率层序地层对比格架,并对格架内沉积体展布规律进行分析(图 7)。

LSC1(MSC1-MSC3):厚约 0~134.5 m,为基准面先快速上升,后缓慢上升再快速下降的不完全不对称旋回,A/S 比值先快速增加,后快速减小。LSC1 底部(MSC1 下部)辫状河沉积的粗碎屑分布在盆地斜坡位置,在盆地边缘的 ZK90、ZK91、ZK140 三个孔均不发育;随后基准面加速上升,LSC1 下部(MSC1)可容纳空间迅速增大,并向盆地边缘迁移,沉积了下粗上细的水下扇砂砾石、三角洲前缘砂和半深湖相粘土,但可容纳空间尚未扩展到 ZK90 和 ZK140 位置。随着沉积物的充填,LSC1 中部(MSC2)可容纳空间迅速减小,仅在 ZKC01 存在可容纳空间,三角洲前缘近漫溢和远漫溢沉积发育。LSC1 上部(MSC3),随着基准面的上升,可容纳空间范围再次增大,除隆起区的 ZK140 外,整个安乡凹陷水体较深,在盆地中形成半深湖相的细碎屑物质夹三角洲前缘粉砂。

LSC2(MSC4-MSC5):厚约 40.1~85.6 m,为基准面上半旋回,由于基准面上升较缓慢,整体 A/S 比值较小。LSC2 下部(MSC4 下部),可容纳空间扩展范围较大,盆地中心和边缘都为辫状河三角洲沉积,除 ZK90 外,整个盆地沉积物厚度基本相同,显示出一种物源供给充足、中等可容纳空间的沉积环境;LSC2 中部(MSC4 上部),随着基准面的缓慢上升,靠近盆地中心的 ZK91 和 ZKC01 为辫状河三角洲,其他位置或为剥蚀不沉积或为低可容纳空间的辫状河沉积;LSC2 上部(MSC5),辫状河河道沉积较发育,砂体连通性较好,从北西向南东具有“侵蚀不沉积—辫状河—辫状河三角洲”的横向变化特征。

地层对比格架显示(图 7),安乡凹陷下更新统华田组为一套辫状河—湖泊三角洲—湖泊—辫状河三角洲的沉积体系,汨罗组为一套辫状河三角洲—辫状河沉积体系。下更新统的华田组沉积、汨罗组沉积及其之间的不整合面,体现了一次大的湖盆形成消亡、暴露风化剥蚀及第二次湖盆形成消亡的过程。其中 MSC1 为湖盆形成阶段, MSC2 为湖盆扩张阶段, MSC3 为湖盆萎缩到快速消亡阶段, SB4 为湖盆快速消亡以及之后的风化剥蚀阶段, MSC4 为第二次盆地形成阶段, MSC5 为第二次盆地鼎盛时期,由于后期的风化剥蚀第二次盆地萎缩阶段沉积未

保存。整个下更新统垂向上反映了两次由湖进到湖退的变化过程。

4 讨论

4.1 安乡凹陷早更新世基准面升降与沉积动力学的关系

研究发现,研究区内早更新统沉积物的沉积动力学可用基准面的升降来合理解释(图 8)。中生代以来研究区相继经历了晚三叠世—侏罗纪陆内 SN 向挤压造山^[27]、白垩纪—古近纪伸展断陷和新近纪挤压抬升^[28]。从渐新世基准面开始下降,至华田组沉积前夕,基准面下降已经到达最低点,可由基准面下降到地表之下而引起洞庭盆地以内的区域发生广泛暴露和古地理环境演化侵蚀,沉积盆地的 A 值及其相应的 A' 值缩小并达最低值;与之对应的物源区(武陵隆起、雪峰隆起和幕阜山隆起母岩区)大面积扩展, S' 值增大达最高值。华田组沉积初期,受到区域伸展作用的影响,洞庭盆地开始伸展断陷形成断陷盆地,此时河流的落差、流域面积和流量快速增大,水动力所能搬运的沉积物数量最多、粒度最粗,并伴随有效可容纳空间向盆地方向迁移,在河流湖泊入口处的盆地斜坡呈过补偿沉积状态,产生进积作用,沉积了华田组底部的砂砾石层。华田组沉积早期,区域伸展作用使洞庭盆地进一步快速下沉,引起基准面加速上升,沉积盆地可容纳空间 A 值及 A' 值快速增大,发育湖泊三角洲沉积和半深湖细碎屑沉积,并出现与沉积动力学条件变化相对应的加积—退积—加积的地层响应过程。华田组沉积中期,随着基准面上升幅度的加大,上升动力不足,可容纳空间很快被由粗变细的沉积物充满(图 4、图 7),表现为两个非完全对称的中期旋回构成的进积—加积—退积—加积和进积—退积—加积层序叠加样式。至华田组沉积晚期,区域构造作用由伸展向挤压反转,基准面和可容纳空间急剧下降,结束了华田组沉积,之后的整体抬升剥蚀形成了华田组顶部的区域不整合面。

从华田组沉积末期基准面开始下降,至早更新世中晚期汨罗组沉积前夕,基准面下降已经到达最低点,沉积盆地的 A 值缩小并达最低值。汨罗组沉积早期,受区域挤压作用影响,盆地开始下凹形成凹陷盆地,此时基准面开始缓慢上升,沉积盆地的

A' 值随之增大,发育辫状河三角洲沉积,出现与沉积动力学条件变化相对应的两个中期基准面旋回,层序叠加样式为进积—加积—退积—加积和进积—加积—退积。整个汨罗组沉积期为一种较低可容纳空间沉积环境,沉积物供给较充足,以粗碎屑为主体夹细碎屑,河道/漫溢比值最大,表明基准面上升速度远没有华田组沉积时期快。

4.2 安乡凹陷早更新世构造—沉积的动力学机制

部分学者认为大型陆相湖盆是由岩石圈构造热升降或岩石圈内部物质重新分布、温度变化造成的岩石圈变形引起的,在它们上面可以形成裂陷型盆地和凹陷型盆地两种类型^[29],其中陆相断陷湖盆具有局限性、多物源、多沉积中心、相变快、相带窄、水域面积小、控盆断裂的活动影响整个盆地水体的变化等特点^[30]。在第四纪华南构造作用研究方面,万天丰^[31]认为华南地区早更新世为SN向挤压;陈立德等^[32]对武汉阳逻王母山断层及地震楔研究后提出,当时的主压应力方向为NW 335°左右;柏道远等^[33]对第四纪洞庭盆地及周缘隆起区的地貌、沉积和断裂构造等进行调查研究,认为早更新世—中更新世中期洞庭盆地为断陷盆地,并且断陷沉降与地幔上隆背景下的深部物质迁出有关。本次从沉积学和地层层序方面分析安乡凹陷更新世构造体制,认为早更新世早期安乡盆地为区域伸展体制下的断陷盆地,理由如下:从华田组基准面旋回特征分析(图4、图7),MSC1与MSC2和MSC3存在较大差异,前者的升降表现为缓慢上升、快速上升和快

速下降的过程,而后两者表现为缓慢上升和快速下降的过程,短期旋回类型和沉积物叠加方式差异也较大,暗示MSC1除了受其自旋回的控制外,还受到构造作用的影响。其次,第四纪安乡凹陷沉积等厚图(图1)及NW—SE向层序对比格架图(图7)清晰地显示了沉积体空间展布特征,华田组沉积明显受到了NNE向次级隆凹构造和边界正断裂控制,沉积体具有厚度变化大、相变快、水域面积较小、沉积物供给不均衡等特征,断裂下降盘一侧的沉积物厚度明显大于上升盘一侧,与杨利伟等^[30]提出的陆相断陷盆地特征较相似。从高分辨率层序地层划分对比中发现,在第四纪盆地初始形成阶段,低水位体系域的辫状河沉积在盆地边缘和外缘分布较稳定(图略),在盆地中心仅分布在靠近断裂的陡坡位置;在NW—SEE向伸展作用下盆地中心快速下沉,沉积了一套由水下扇、湖泊三角洲和半深湖组成的向上快速变深的沉积物,而盆地边缘依旧为冲积扇和辫状河沉积,而水下扇的形成是断陷盆地的标志之一^[34]。综上分析,认为第四纪安乡盆地乃至整个洞庭盆地早期演化阶段主要受控于伸展体制下的断陷作用,与柏道远等^[19]提出的安乡凹陷早更新世早期赤山隆起西缘最先形成正断裂的结论一致,其深层次的构造动力学机制可能与深部地幔上隆炙烤地壳,使地壳拆沉减薄物质逃逸有关^[33]。

笔者通过地质调查和钻孔资料发现,华田组沉积物与上覆的汨罗组沉积物在沉积物的组成、固结程度、颜色等方面存在明显的差异。华田组粘土层

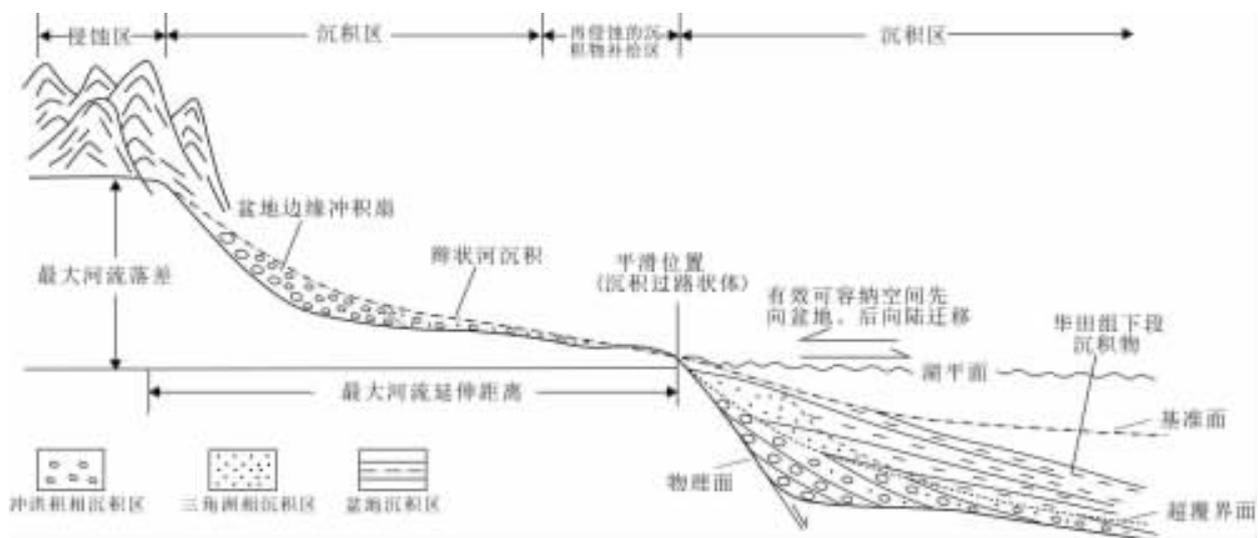


图8 华田沉积早期(MSC1期)基准面升降与沉积动力学的关系模式(据文献^[24]修改)

Fig. 8 The relationship between rise or fall range of base-level and sedimentary dynamics(According to Ref. ^[24] changes)

和粉砂质粘土以杂色(青灰、黄白、黄绿、灰绿、桔黄、棕黄、灰黄、浅黄、绛红色等)为主,不同颜色的粘土常相间、交错而形成条带状、团块状、晕状等构造,这种结构的形成类似于中更新世晚期的华南网纹化事件中形成的网纹,为重要的暴露标志,且在钻孔岩心中见明显的不整合界面。鉴于此,认为洞庭湖盆地早更新世中期存在一种区域上的暴露事件,为华田沉积末期区域构造体制反转的直接证据。

从汨罗组基准面旋回特征分析(图4),汨罗组沉积早期的中期基准面为快速上升、缓慢上升到快速下降的非完全对称旋回,地层叠加方式由B型短期旋回组成的进积突然变化为由C型短期旋回构造的加积,暗示中期基准面旋回受到了构造作用的影响,而基准面上升速度远没有华田组沉积时期快,表明构造作用较弱。汨罗组沉积末期,挤压作用使地壳抬升,最接近地表的汨罗组上段沉积物遭受了不同程度的剥蚀。因此,笔者认为早更新世洞庭盆地安乡凹陷经历了伸展断陷—挤压抬升—弱挤压凹陷—挤压抬升的构造演化过程,当然也不排除汨罗组沉积期有地幔物质隆升的可能性。

5 结论

(1) 运用高分辨率层序地层学理论及方法,并按基准面旋回原理将安乡凹陷早更新世华田组和汨罗组划分为2个长期、5个中期和25个短期旋回层序;短期旋回层序叠加样式有完整的记录了基准面上升和下降期沉积的近对称性旋回(C型)、只发育基准面上升期沉积的非对称型旋回(A型)和只发育下降半旋回沉积的非对称型旋回(B型)三种;整个下更新统表现为一个大的湖盆从发育到消亡,然后暴露风化剥蚀,以及之后的缓慢沉降到抬升—消亡过程。

(2) 安乡凹陷早更新世基准面升降与沉积动力学(即沉积物的剥蚀、搬运和堆积过程)具有很好的吻合性,都受控于早更新世洞庭盆地的伸展断陷和之后的挤压凹陷作用。

(3) 早更新世洞庭盆地安乡凹陷经历了伸展断陷—挤压抬升—弱挤压凹陷—挤压抬升的构造演化过程,其深层次的构造动力学机制可能与深部地幔上隆炙烤地壳、下地壳拆沉和物质逃逸有关。

野外工作和室内工作得到了柏道远研究员级高级工程师和张晓阳高级工程师的大力支持和悉心指导,在此表示诚挚感谢。

参考文献:

- [1] Mitchum Jr R M, Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles [J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70(2):131-160.
- [2] Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation [C].//Rocky Mountain Association of Geologists, 1994: 28-41.
- [3] Cross T A. Stratigraphic control on reservoir attribute in continental strata[J]. *Earth Frontiers*, 2000, 7(4):322-250.
- [4] Galloway W E. Genetic stratigraphic in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded deposition units[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(2): 125-142.
- [5] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. *石油与天然气地质*, 1995, 16(2):90-97.
- [6] 邓宏文,王洪亮,李熙喆.层序地层基准面的识别、对比技术及应用[J].*石油与天然气地质*, 1996, 17(3):177-184.
- [7] 赵举兴,李长安,许应石.洞庭盆地古沅江砾石层的沉积特征及沉积环境[J].*地质科技情报*, 2014, 33(1):85-89
- [8] 柏道远,刘波,倪艳军,马铁球,王先辉,彭云益,李纲.湘东北湘阴凹陷控盆断裂特征、盆地性质及动力机制研究[J].*资源调查与环境*, 2010, 31(3):157-168.
- [9] 景存义.洞庭湖的形成与演变[J]. *南京师院学报自然科学版*, 1982, (2):52-60.
- [10] 王道经,黄怀勇.洞庭湖现代构造与湖盆演变[J].*湖南地质*, 2000, 19(1):30-36.
- [11] 杨达源.洞庭湖的演变及其整治[J].*地理研究*, 1986, 5(3): 39-46.
- [12] 徐杰,邓起东,张玉岫,殷秀华,魏顺民,牛雯芳.江汉—洞庭盆地构造特征和地震活动的初步分析 [J]. *地震地质*, 1991, 13(4):332-342.
- [13] 梁杏,张人权,皮建高,张国梁,孙锡良.洞庭盆地第四纪构造活动特征[J].*地质科技情报*, 2001, 20(2):11-14.
- [14] 皮建高,潘晟.洞庭湖区构造沉降特征及监测方案[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(1):9-12.
- [15] 刘锁旺,甘家思,李蓉川,韩晓光,申重阳.江汉洞庭盆地的非对称扩张与潜在地震危险性[J].*地壳形变与地震*, 1994, 14(2):56-66.
- [16] 柏道远,李长安.洞庭盆地第四纪地质研究现状[J].*地质科技情报*, 2010, 29(5):1-8.

- [17] 柏道远,李送文,周柯军,马铁球,王先辉,彭云益,李纲.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[J].中国地质,2010,37(2):280-297.
- [18] 柏道远,李建清,马铁球,王先辉,彭云益,李纲,周柯军.第四纪江汉-洞庭盆地东部中段构造-沉积地貌类型划分及特征[J].地理科学,2010,30(2):236-241.
- [19] 柏道远,李长安,马铁球,王先辉,陈渡平.第四纪洞庭盆地安乡凹陷及西缘构造-沉积特征与环境演化[J].地球科学与环境学报,2010,32(2):120-129.
- [20] 柏道远,马铁球,王先辉,等.1:250000常德市幅和岳阳市幅区域地质调查报告[R].湖南长沙:湖南省地质调查院,2009.
- [21] 陈渡平,李长安,柏道远,何禹,蒋启生,陈帅奇.洞庭盆地第四纪地层格架初拟[J].地质科技情报,2014,33(1):67-73.
- [22] 赵举兴,李长安,张玉芬,强小科,熊德强.洞庭盆地S3—7孔第四纪年代地层[J].地球科学,2016,41(4):633-643.
- [23] 郑荣才,文华国,李凤杰.高分辨率层序地层学[M].北京:地质出版社,2012:9-14.
- [24] 郑荣才,尹世民,彭军.基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析[J].沉积学报,2000,18(3):369-374.
- [25] 汪彦,彭军,游李伟,陈果.基准面旋回与A/S比值的函数关系及地质意义[J].沉积学报,2005,23(3):483-489.
- [26] 彭军,陈景山,郑荣才,蔡勋育,韦景春.百色盆地百岗组高分辨率层序分析及研究意义[J].地球学报,2002,23(2):153-158.
- [27] 柏道远,倪艳军,李送文,马铁球,王先辉,彭云益,李纲.江南造山带北部早中生代岳阳-赤壁断褶带构造特征及变形机制研究[J].中国地质,2009,36(5):996-1009.
- [28] 柏道远,刘波,倪艳军,马铁球,王先辉,彭云益,李纲.湘东北湘阴凹陷控盆断裂特征、盆地性质及动力机制研究[J].资源调查与环境,2010,31(3):157-168.
- [29] 龚一鸣,张克信.地层学基础与前沿[M].武汉:中国地质大学出版社,2007:119-139.
- [30] 杨伟利,姜在兴,操应长,孙钰.陆相断陷盆地可容空间转换特征[J].沉积学报,2009,27(2):299-305.
- [31] 万天丰.中国第四纪的构造事件与应力场[J].第四纪研究,1994.(1):48-55.
- [32] 陈立德,邵长生,王岑.武汉阳逻王母山断层及地震楔构造研究[J].地质学报,2014,88(8):1453-1460.
- [33] 孙连浦,刘招君,李本才,董清水,朱建伟,吴邦昊.水下扇岩相特征及形成机制[J].世界地质,2001,20(3):249-256.
- [34] 柏道远,李长安,王先辉,马铁球,周柯军,彭云益,李纲,陈渡平.第四纪洞庭盆地构造性质及动力机制探讨[J].大地构造与成矿学,2010,34(3):317-330.