

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.02.004

湘东南茶永盆地白垩纪—古近纪沉积古地理演化

吴学洪¹, 徐亚东^{1,2,3*}, 许笑玮¹, 张黎渊^{1,3}, 何妍¹

WU Xue-Hong¹, XU Ya-Dong^{1,2,3*}, XU Xiao-Wei¹, ZHANG Li-Yuan^{1,3}, HE Yan¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院流域关键带演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)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(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074

1. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 华南中生代沉积盆地的演化历史记录了区域构造、岩浆和气候事件, 对其进行研究可以为揭示区域地貌成因和沉积矿产的找矿勘探提供理论支撑。本文综合分析湘东南茶永盆地的地层对比、沉积相、控盆构造和地质事件等资料, 揭示其古地理演化过程。根据茶永盆地的岩石组合、地层序列及古生物组合面貌, 自下而上划分为栏垅组(K_{1l})、神皇山组(K_{1sh})、罗镜滩组(K_{1j})、红花套组(K_{1h})、枣市组(K_{2Ez}) 5个地层单元; 识别出坡积相、洪积相、三角洲平原相、湖泊相4个沉积相类型, 其中湖泊相细分为滨湖亚相和浅湖亚相。古流向、沉积物源和控盆断裂分析认为茶永盆地沉积古地理演化分为三个阶段: 在早白垩世, 盆地南缘受正断层和走滑断层控制发生断陷开始接受沉积, 为近源快速堆积的坡积相和滨湖相, 物源来自于南部的栖霞渡—许家洞低山丘陵区 and 东部的鲤鱼塘低山区; 晚白垩世早期, 受盆缘两侧逆冲断层控制, 沉积中心向西北迁移, 东高西低的地貌格局使得盆地西部成为沉降中心, 为最大的湖盆扩张期, 物源主要来自于盆地东侧的低山区; 至晚白垩世晚期—古近纪, 盆地沉降中心转移到盆地西缘并收缩形成两个孤立的湖盆, 最终受逆冲断层控制萎缩消亡, 物源区为西侧和北侧的低山丘陵区。茶永盆地白垩纪—古近纪沉积古地理演化为古太平洋板块和印度板块运动在华南内部的远程响应, 构造体制在此期间发生了伸展—挤压—走滑的三次转变, 区域发生的沉积、岩浆、火山事件和季风起源与上述板块运动存在耦合关系。

关键词: 地层对比; 古流向; 物源分析; 沉积古地理; 茶永盆地; 湘东南

中图分类号: P544+.4; P531

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)02-0214-21

Wu X H, Xu Y D, Xu X W, Zhang L Y and He Y. 2023. Cretaceous–Paleogene Paleogeographic Evolution of the Chaling–Yongxing Basin in Southeastern Hunan Province. *South China Geology*, 39(2):214–234.

Abstract: The Meso-Cenozoic sedimentary basins in South China can respond to tectonic, magmatic and climatic events, the evolution process of which can provide support for regional geomorphological genesis research and prospecting and exploration of sedimentary minerals. In this paper, based on comprehensive analysis of stratigraphic comparison, sedimentary facies, basin-controlling fault and geological events of the Chaling-Yongxing Basin (CYB) in southeastern Hunan Province, the sedimentary paleogeographical evolution was revealed. According to rock assemblage, stratigraphic sequence and paleontology of the CYB, it was di-

收稿日期: 2023-4-19; 修回日期: 2023-5-18

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221645, DD20190811)

第一作者: 吴学洪(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事沉积学、古地理演化研究, E-mail: 2274513946@qq.com

通讯作者: 徐亚东(1983—), 男, 副教授, 从事古生物地层学和沉积古地理研究, E-mail: yadong.xu@cug.edu.cn

vided into five stratigraphic units from bottom to top: Lanlong Formation (K_1l), Shenhuangshan Formation (K_1sh), Luojiangtan Formation (K_2l), Honghuatao Formation (K_2h), and Zaoshi Formation (K_2E_{1z}). Four sedimentary facies were identified: deluvial facies, diluvial facies, delta plain facies and lacustrine facies, among which two subfacies were subdivided: shore lake and shallow lake. On the basis of paleocurrent direction, provenance analysis and basin-controlling fault, the sedimentary paleogeographical evolution of CYB was divided into three stages: during Early Cretaceous, controlled by normal fault and strike-slip fault, the southern margin of the basin started to collapse and receive sedimentary and turned to deluvial and shore lake with rapid accumulation, and the sedimentary sources were from hills and low mountain area in the southern Qifengdu-Xujiadong and low mountain area in eastern Liyutang. At early Late Cretaceous, the sedimentary center migrated northwest-ward to result in west basin subsidence with high area in the east and low area in the west controlled by thrust faults on both side of the basin margin, forming the largest lacustrine expansion, and the sources were mainly from the low mountainous area on the eastside of the basin. At late Late Cretaceous-Paleogene, the subsidence center shifted to the western margin of the basin and was contracted to form two isolated basins, which were controlled by thrust faults and disappeared eventually. The source area was from hills and low mountain area in western and northern sides. The sedimentary paleogeographical evolution of the CYB responds to the distant effect of the Pacific plate and Indian plate subduction, and undergoes three shifts of stretching, extrusion and strike-slip. It is a coupling relationship between the sedimentary, magmatic and volcanic events in the region and monsoon origin and above tectonic movement in South China.

Key words: stratigraphic comparison; paleocurrent direction; provenance analysis; sedimentary paleogeography; the Chaling-Yongxing Basin; Southeastern Hunan Province

湘东南地区中生代以来主要发育以碎屑岩为主的陆相沉积,在氧化条件下地层被铁氧化物浸染形成“红层”(Quan C et al., 2014; 徐先兵, 2022),其中衡阳、醴攸、茶永、株洲、湘潭、长平等红层盆地成为研究焦点。晚白垩世—始新世早期衡阳盆地受西风环流、副热带反气旋、沿海山脉造成的雨影效应共同影响形成干旱沙漠/草原气候(Zhang Z et al., 2012; Li X Y et al., 2018; 黄乐清等, 2019; Xie Y L et al., 2020),发育蒸发岩矿床(Xie Y L et al., 2020)、风成沉积(黄乐清等, 2019),晚古新世特提斯海的逐步闭合使得华南地区进入干燥气候期(徐亚东等, 2014; 王九一等, 2021)。矿物、岩石及孢粉组合特征表明湘东南白垩纪—古近纪主要为温暖—炎热干旱—半干旱的亚热带气候(陈云华, 2008; 张清如, 2009; 朱宁等, 2020);根据岩性、古哺乳类化石、磁性剖面、介形类动物群和碳同位素研究,衡阳盆地古近纪早期地层可分为古新统栗木坪组和始新统岭茶组(童永生等, 2006; 张显球等, 2010)。

茶永盆地为华南褶皱系内NE-SW向展布的断

拗型构造盆地,北起茶陵高陇,南止于郴州市苏仙区及邻区,全长大于150 km,宽约15 km,面积约2200 km²(图1),主要受NE-NNE向的茶陵—临武、三都—郴州—连山断裂带控制,断裂对盆地地貌有较强的制约作用(肖本夫等, 2019; Xu X B et al., 2021),盆内发育一系列复向斜,东侧为高山、西侧为低山丘陵,盆内除西部及南部的一部分为山地环丘陵地形外,多数为悬崖孤峰组成的丹霞地貌。盆地主要发育K-E地层,露头良好,四周主要出露前白垩纪地层及一系列花岗岩体,醴攸盆地西部及衡阳盆地东南部发育少量玄武岩。前人对盆地内沉积地层、古生物、地质构造、沉积相等做了大量研究(湖南省革命委员会地质局区域地质测量队, 1965, 1969, 1970; 中南矿冶学院地质系红层科研小组, 1975; 湖南省地质调查院, 2005, 2012; 赵小明等, 2017),由岩相、碎屑组分指数和大气CO₂浓度推断盆地晚白垩世—古近纪为较炎热的干旱—半干旱气候(刘芮岑等, 2018; 刘芮岑, 2018)。综合前人在盆地获得的地质数据和本次野外工作取得的第一手资料,

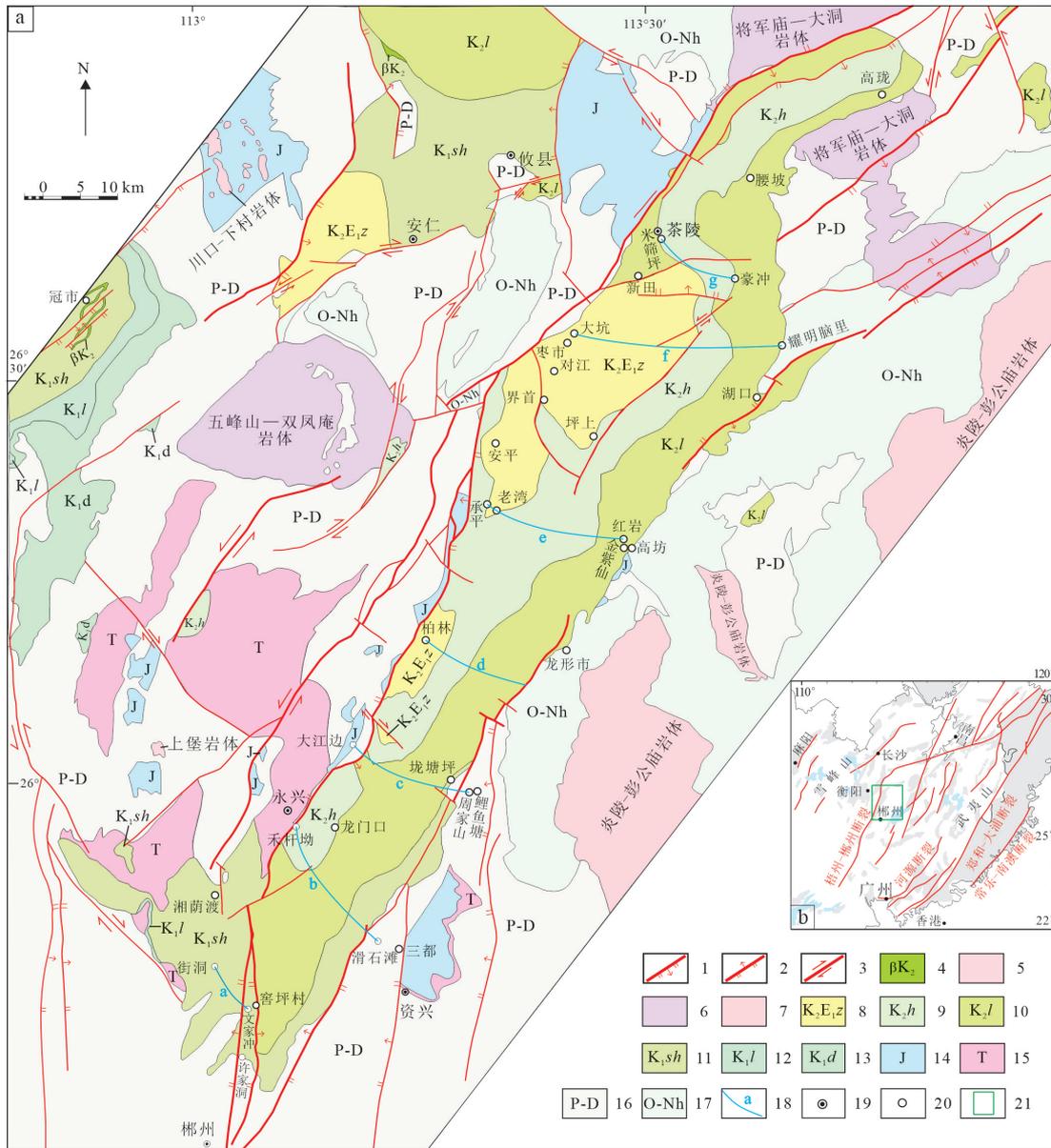


图1 茶永盆地构造格局、位置和研究剖面分布图

Fig. 1 Tectonic background, research location and section distribution of the Chaling-Yongxing Basin

a图据湖南省地质调查院(2005)修改;b图据舒良树等(2004)修改

1. 正断层;2. 逆断层;3. 走滑断层;4. 橄欖-伊丁玄武岩;5. 燕山期花岗岩;6. 印支期花岗岩;7. 加里东期花岗岩;8. 枣市组;9. 红花套组;
10. 罗镜滩组;11. 神皇山组;12. 栏垅组;13. 东井组;14. 侏罗系;15. 三叠系;16. 二叠系-泥盆系;17. 奥陶系-南华系;
18. 剖面;19. 县市;20. 乡镇;21. 研究区范围

本文基于盆地的地层对比、沉积环境分析、古流向和物源数据,探讨盆地的沉积演化过程及其控制因素。

1 白垩纪—古近纪地层划分和对比

1.1 研究剖面概述

根据7条剖面的岩石组合特征、沉积序列

(图2)可将茶永盆地白垩纪-古近纪地层自下而上划分为:神皇山组(K_{1sh})、罗镜滩组(K_{2l})、红花套组(K_{3h})、枣市组(K_{4z})4个岩石地层单位。剖面a主要发育神皇山组,剖面b发育神皇山组至红花套组3套地层,剖面c、d则4套地层皆有发育,剖面e、f发育罗镜滩组至枣市组3套地层,剖面g主要发育红花套组。此外,后文补充盆地西南部发育的栏垅组

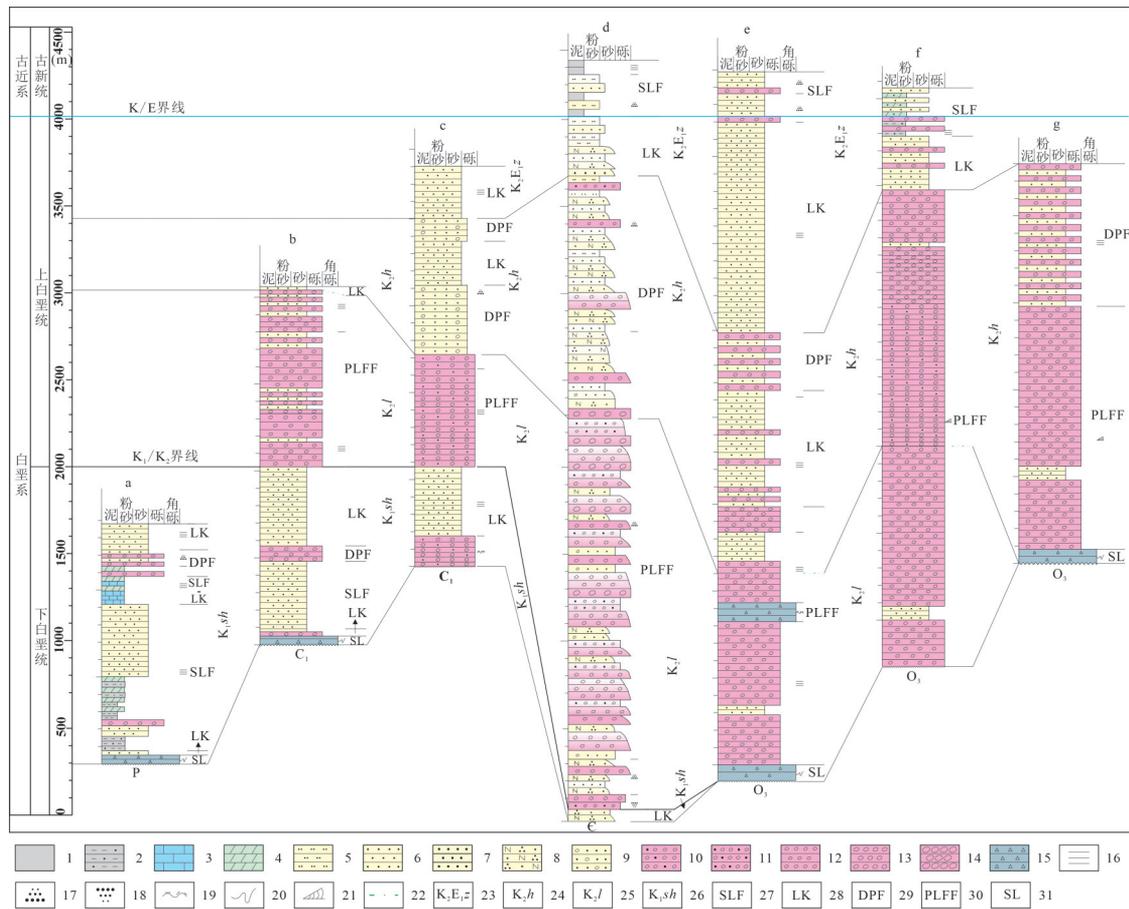


图2 茶永盆地沉积剖面地层对比

Fig. 2 Lithological column and stratigraphic comparison of the Chaling-Yongxing Basin

剖面d和g为本文实测剖面,其他剖面据中南矿冶学院地质系红层科研小组(1975)修改,具体位置见图1

1. 泥岩; 2. 含砂泥岩; 3. 灰岩; 4. 泥灰岩; 5. 粉砂岩; 6. 细粒砂岩; 7. 中粒、中细粒、中粗粒砂岩; 8. 长石石英砂岩; 9. 含砾砂岩;
10. 含砂砾岩; 11. 砂质砾岩; 12. 细砾岩; 13. 中、中细、中粗砾岩; 14. 粗砾岩; 15. 角砾岩; 16. 水平层理; 17. 正粒序层理; 18. 逆粒序层理;
19. 冲刷面构造; 20. 滑塌层理; 21. 楔状交错层理; 22. 沉积旋回辅助线; 23. 枣市组; 24. 红花套组; 25. 罗镜滩组; 26. 神山山组;
27. 浅湖相; 28. 滨湖相; 29. 三角洲平原相; 30. 洪积相; 31. 坡积相

(湖南省地质调查院, 2005)。

沉积构造是分析地层层序、搬运介质、古水流、沉积环境等的重要依据,目前已对野外调查发现的盆地内原生沉积构造进行系统划分。本文共划分出三大类原生沉积构造:(1)层内构造:①水平层理(图3 a);②平行层理(图3 b);③粒序层理(图2,正、逆粒序层理);④斜层理:单向斜层理(图3 c)、波状交错层理(图3 d)、槽状交错层理,即舟状交错层理(图3 e)、楔状交错层理(图3 f)、交错泥砾斜层理(图3 g)等;⑤透镜状层理(图3 h);⑥砾石条带层理(图3 i、j);⑦波状斜层理(图3 k)。(2)顶底面规则或不规则的层面构造:①冲刷面构造(图3 l);②虫迹(图3 m);③波痕(图3 n);④泥裂(图3 o)。

(3)准同生变形构造:①崩塌构造(图3 p);②贯入构造(图3 q);③涡流构造(图3 r)。

本文依据地层的主要岩石类型及岩性组合规律共划分出坡积相、洪积相、三角洲平原相、湖泊相4类沉积相,其中湖泊相又划分出滨湖相、浅湖相2类亚相。坡积相以角砾岩为主;洪积相主要以厚层砾岩为主,局部夹砂岩;三角洲平原相主要以砂岩与砾岩互层为主,局部会以砂岩或者含砾砂岩为主;滨湖相主要以砂岩为主,局部夹砾岩,浅湖相岩性比较复杂,主要为泥岩、泥灰岩、灰岩、砂岩、砂质泥岩、砾岩。

根据剖面岩性组合、沉积序列以及生物化石等特征本文划分出了K₁/K₂界线和K₂/E界线(图2)。在剖面上,K₁/K₂界线处岩性组合出现了巨大差异,下

部为厚层砂岩,上部为厚层砾岩,界线处出现冲刷面构造;K₂/E界线处出现了岩性组合的明显差异,其中本文实测剖面d在界线处出现1~3 cm的灰绿色粉砂岩、粉砂质泥岩条带。

1.2 沉积相分析

1.2.1 坡积相

下白垩统主要发育于许家洞镇—三都镇一带,上白垩统主要发育于金紫仙镇—湖口镇一带,为一套底砾岩,有重力崩塌和滑塌堆积两类成因,常发

育于山麓及滨湖地带,属于近源堆积,重力崩塌者成分单一,无分选、无层理、无定向排列、形状不规则,常成堆产出(图4 a);滑塌堆积者多为泥砂质、铁质充填胶结,较疏松、易风化,灰岩为主的砾石则以灰质胶结为主,胶结紧密,成分不稳定,厚度变化大,岩层倾角较陡,大于30°~40°。

1.2.2 洪积相

盆地东部于晚白垩世隆升,使得洪水期所携带的碎屑物质在东部山麓地带大量沉积形成洪积

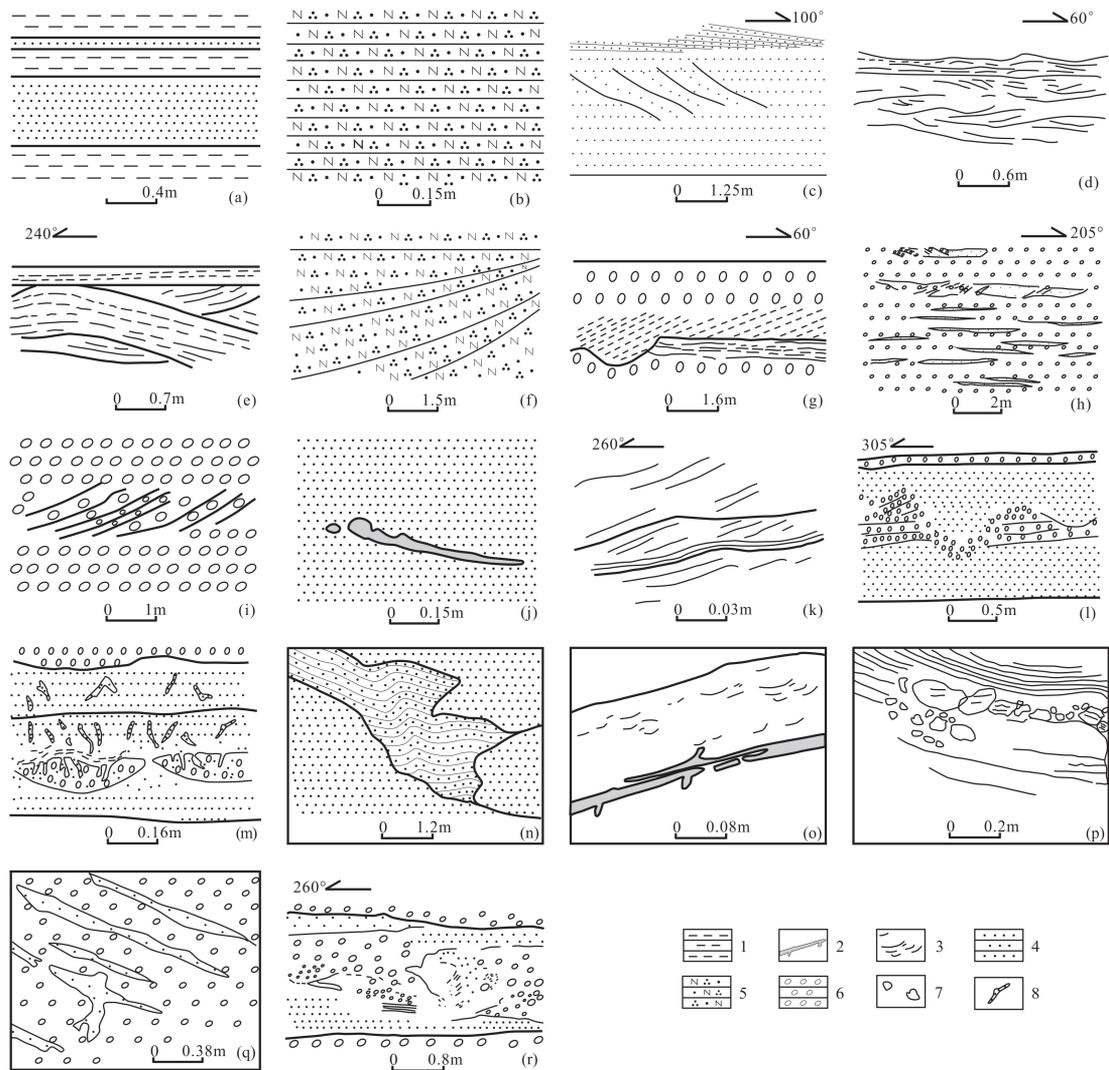


图3 原生沉积构造素描图

Fig. 3 Sketch of the primary sedimentary structure

(a)水平层理(柏林虹桥村);(b)平行层理(永兴龙形市);(c)单向斜层理(安仁龙会洲);(d)波状交错层理(安仁下洞);(e)舟状交错层理(安仁下洞);(f)楔状交错层理(永兴龙形市);(g)交错泥砾斜层理(安仁下洞);(h)交织状砂岩透镜体(安仁老湾);(i)砾石条带及斜层理(永兴龙门口);(j)砂岩中的泥质条带(永兴龙形市);(k)波状斜层理(安仁盘塘);(l)砾岩底冲刷面构造(安仁豪峡);(m)虫迹(安仁角冲垄);(n)波浪(永兴龙形市乡);(o)泥岩透镜体与泥裂(安仁岩下);(p)崩塌现象(苏仙区婆婆崖隧道北);(q)贯入构造(红岩中学东300米);(r)涡流构造(安仁黄泥冲);

1. 泥岩;2. 泥质充填;3. 泥裂;4. 砂岩;5. 长石英砂岩;6. 砾岩;7. 角砾岩;8. 虫迹。

扇。依据岩性组合、沉积序列大致划分出扇根、中部、前缘三个亚相,三者逐渐过渡、无明显界线,主要岩性为砾岩、砂岩,由扇根到扇缘砂岩成分逐渐增多,在纵剖面往上砂岩增多、粒度变细、分选性好、韵律明显。洪积相层面构造及同生构造不发育,发育水平层理、平行层理(图4 b)、斜层理(图4 c)、泥砾互层、砾石条带层理、冲刷波状层理、韵律性递变层理、透镜状层理、泥裂、虫迹、水下侵蚀冲

刷面,中部个别层发育“涡流构造”和“贯入构造”。

1.2.3 三角洲平原相

三角洲平原相主要发育于洪积相与滨湖相之间,岩石类型有砾岩(图4 d)、砂岩、粉砂岩等,韵律比较明显且较稳定,基本韵律厚度巨大,发育水平层理、斜层理、泥砾层理、微细层理、透镜状层理、水平层理、泥裂、虫迹、底冲刷面、同生泥砾及波痕等原生沉积构造。

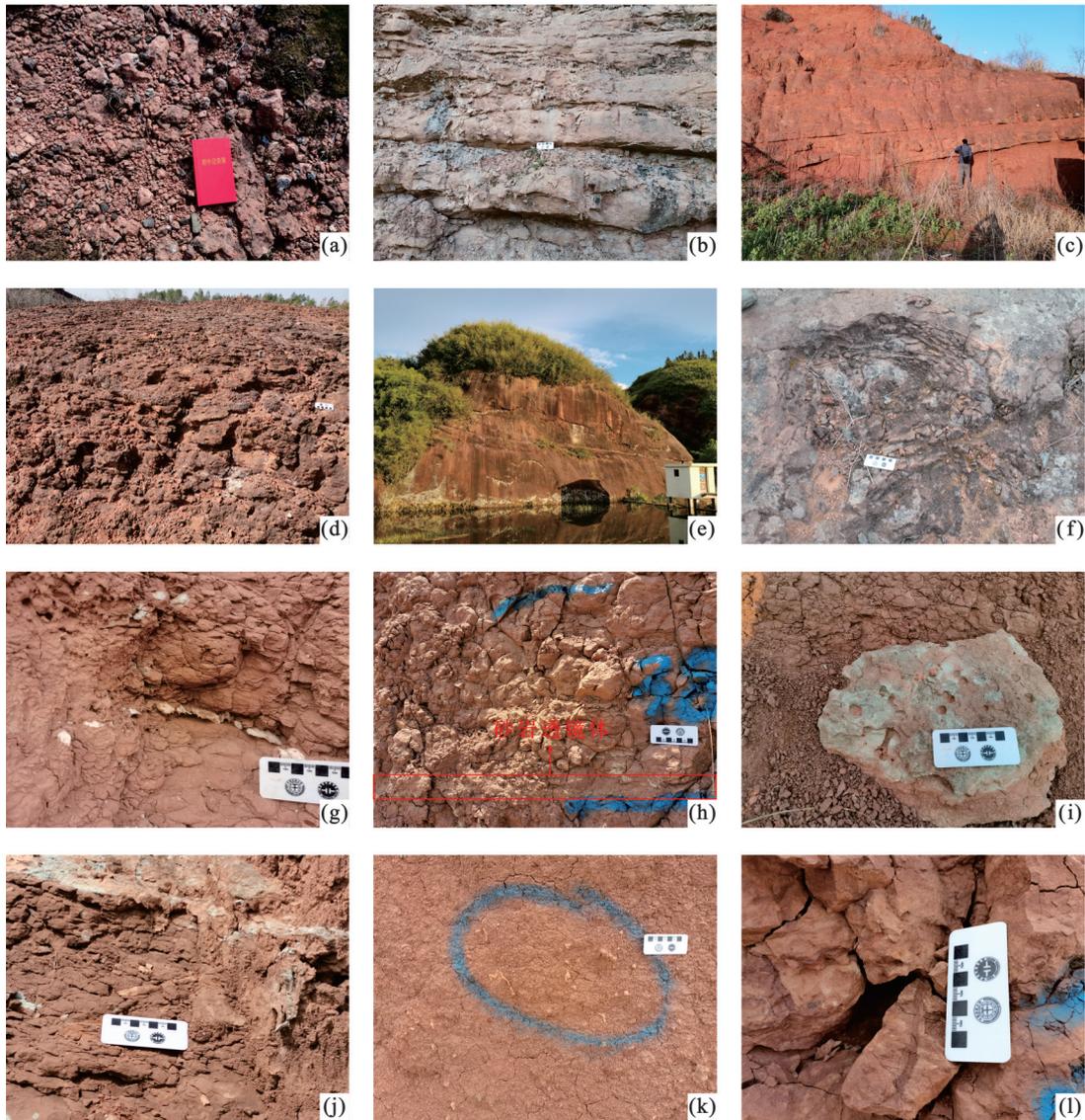


图4 野外典型沉积现象

Fig. 4 Typical sedimentary photos in the field

- (a)茶陵县高陇镇小关村罗镜滩组(K₂l)坡积相砾岩;(b)茶陵县高陇镇小关村红花套组(K₂h)平行层理;(c)茶陵县腰潞镇双车村红花套组(K₂h)楔状斜层理;(d)茶陵县荷树下村水库红花套组(K₂h)砾岩透镜体;(e)永兴县龙形市乡神皇山组(K₁sh)板状交错层理;(f)永兴县龙形市乡神皇山组(K₁sh)底冲刷面;(g)茶陵县茶祖公园枣市组(K₂E_{1z})石膏夹层;(h)茶陵县茶陵南站枣市组(K₂E_{1z})砾岩透镜体;(i)茶陵县茶祖公园枣市组(K₂E_{1z})生物潜穴;(j)茶陵县茶祖公园枣市组(K₂E_{1z})砂质充填生物潜穴;(k)茶陵县茶陵南站枣市组(K₂E_{1z})砂质交代植物化石;(l)茶陵县茶陵南站枣市组(K₂E_{1z})泥质交代植物化石

1.2.4 湖泊相

湖泊相在早白垩世发育于盆地南缘,晚白垩世发育于盆地西部,古近纪时发育于柏林、承平—枣市两处。(1)滨湖相主要发育两类岩石组合:湖盆盐度低、物源充分时发育碎屑岩,沉积韵律、原生沉积构造不发育;碳酸盐浓度高时湖盆发育碎屑—碳酸盐岩,沉积韵律发育,发育水平层理、同生泥砾、波痕、板状交错层理(图4 e)、水平微细层理、透镜状层理、冲刷波状层理、虫迹、底冲刷面(图4 f)等。(2)浅湖相主要发育3套岩石组合:含泥灰质细砂岩粉砂岩—砂质泥灰岩—石膏组合、砂岩—粉砂岩—石膏组合、粉砂岩—泥灰岩—石膏组合(图4 g),发育水平层理、水平微细层理、页状微细层理、透镜状层理(图4 h)、波状斜层理、虫迹、生物潜穴(图4 i、j),保存大量泥质或砂质交代植物化石碎屑(图4 k、l)。

1.3 地层划分和对比

根据实测剖面数据以及前人的研究资料,将盆地沉积地层自下而上划分为栏垅组(K_1l)、神皇山组(K_1sh)、罗镜滩组(K_2l)、红花套组(K_2h)、枣市组(K_2Ez)5个岩石地层单位(图2)。(1)栏垅组:见于盆地西南缘苏仙区栖凤渡一带,出露面积小,与下伏地层呈角度不整合接触,透镜状分布,厚0~262.8 m,为紫红色、紫灰色块状复成份砾岩。(2)神皇山组:主要发育于盆地南缘,与栏垅组呈整合接触,厚度240~922.2 m,岩性为紫红色、砖红色厚层-巨厚层(局部块状)含砾砂岩、砾质砂岩,夹粉砂岩,属三角洲平原相、湖泊相沉积,底部出现坡积相沉积。(3)罗镜滩组:在盆地内部大面积发育,平行不整合于神皇山组之上,厚300~1445.3 m,厚度变化较大,盆地东南翼厚,北西翼薄,为洪积相沉积,盆地中部东缘为坡积相沉积,岩性以砾石、含砂砾岩为主,发育少量砂岩。(4)红花套组:主要发育于盆地的中西部,厚度变化较大,盆地中部莲塘一带最厚,南北两侧薄,主要为陆相含砾的砂岩,向上粉砂岩增多,与下伏罗镜滩组整合接触,以大套砾岩、含砾砂岩的消失和大套杂砂岩的出现作为本组之底界,在盆地中为湖泊相、三角洲平原相、坡积相沉积。(5)枣市组:主要分布于柏林、承平—界首—枣市一带,整合于红花套组之上,厚度0~653.2 m,岩

性主要为紫红色泥岩、粉砂岩、细砂岩,下部主要为细砂岩,向上泥质粉砂岩层逐渐增多,上部以紫红色泥岩为主,主体为湖泊相沉积,局部出现三角洲平原相沉积。

2 沉积古地理演化

2.1 古流向分析

古流向分析是进行物源分析与古地理沉积演化分析的重要手段,本文主要依据砾石的定向分布及斜层理对晚白垩世古流向进行整理分析。

通过砾石扁平面玫瑰花图判定永兴龙门口一带的优势古流向为 55° 、 235° ,通过分析保留 235° (图5 a),安仁高坊一带的优势古流向为 339° (图5 b);通过透镜体中砾岩砾石的定向排布判定安仁老湾的古流向为 205° (图3 h);根据斜层理判定永兴龙门口、茶陵下西岸的古流向为 280° (图5 c、5 d),安仁豪峡的古流向为 305° (图3 l),安仁龙会洲的古流向为 100° (图3 c),安仁下洞的古流向为 60° (图3 d、g),安仁岩鹰渐的古流向为 340° (图5 e),永兴碗厂垄的古流向为 330° (图5 f)。

通过最大砾石扁平面定向性的产状数据分析,在茶陵县高陇镇小关村(A)、茶陵县火田镇茅坪山烈士陵园(B)、茶陵县大岳村(D)、茶陵县荷树下村水库(E)、茶陵县下东街道头铺村(F)获得古流向和物源数据,茶陵县火田镇曾家里村(C)的古流向是通过测量楔状交错层理得到的,对这6组层理数据和地层原始产状(S0)通过stereonet软件校正的数据列于表1,并将复原后的古流向数据以方位角每 10° 为一间隔、共分为36组进行整理归类,计算出每组古流向数目占古流向总数的百分比,绘制古流向玫瑰花图,通过对每个测点的主体古流向求和后算均值可以得到茶陵县高陇镇小关村(A)古流向主体方向为 15° ,茶陵县火田镇茅坪山烈士陵园(B)古流向为 297° ,茶陵县火田镇曾家里村(C)古流向为 305° ,茶陵县大岳村(D)古流向为 284° ,茶陵县荷树下村水库(E)古流向为 334° ,茶陵县下东街道头铺村(F)古流向为 133° 。

晚白垩世茶永盆地东侧地势比西侧高,基于古流向数据分析,认为永兴—高陇盆地的主要物源区

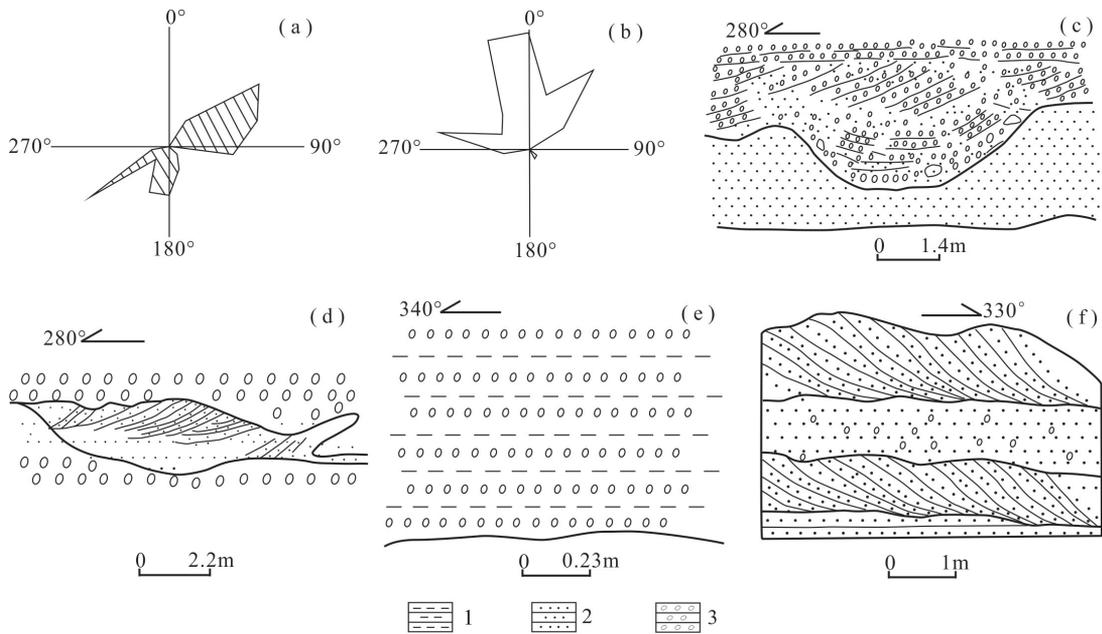


图 5 古流向玫瑰花图、典型的斜层理及古流向素描图

Fig. 5 Paleocurrent rose diagram, Typical sketch of cross-bedding and paleocurrent data

(a) 洪积相中部相基于砾岩砾石扁平面的古流向玫瑰花图(永兴龙门口);(b) 洪积相中部相基于砾岩砾石扁平面的古流向玫瑰花图(安仁高坊);(c) 冲刷凹坑上的斜层理(永兴龙门口);(d) 砂质透镜体中的斜层理及分支现象(茶陵下西岸);(e) 泥砾水平层理(安仁岩鹰渐);(f) 永兴碗厂堑 K₂d 交错层理;1. 泥岩;2. 砂岩;3. 砾岩

为盆地东侧的高珑山、湖口低山区、鲤鱼塘低山区,属于远源搬运。由于盆地东侧高山、低山丘陵区提供的物质会向盆地东缘近距离快速堆积,因此从金紫仙至高珑一带的盆地边缘出现连续、宽度较窄的坡积相;在盆地西侧沉积物质由茶陵丘陵区运移至永兴—高珑盆地,属于近源搬运,虽然缺乏相应的物源数据,但是依据盆地东侧的物源数据可以推测盆地西侧的茶陵低山区、永兴—衡东山、永兴—衡东低山—丘陵区也可能为盆地的物源区,来自这些物源区的沉积物质也会向盆地西缘近距离快速堆积,因此从承平至茶陵一带盆地边缘也会出现宽度较窄的坡积相。

2.2 物源分析

沉积物物源分析是分析源汇过程、盆地演化及恢复古地理的重要手段。本文主要通过实际测量及收集前人研究获得的主要砾石成分来进行物源分析,砾石成分数据整理如表 2,依据湖南省地质调查院(2005)的各年代地层岩性组合、砾石成分饼状图及其所处位置、古流向可进行物源分析。

(1) K₁: 早白垩世的沉积物主要来源于盆地周

围离沉积区较近的栖凤渡低山区、许家洞丘陵区、鲤鱼塘低山区等地(图 6 I)。栖凤渡一带的砾石中的硅质岩、粉砂岩、石英砂岩、灰岩主要来自于其南西部二叠系,砂岩主要来自于其南西部泥盆系;许家洞一带砾岩中的燧石、灰岩、砂岩主要来自于其南部地区的二叠系;鲤鱼塘一带砾岩中的石英砂岩、粉砂岩主要来源于其东部的石炭系和泥盆系,长石石英砂岩主要来源于其东部寒武系。

(2) K₂: 晚白垩世的沉积物成分主要来源于盆地东部的许家洞丘陵(含文家冲一带)、鲤鱼塘低山区(含龙门口、龙形市一带)、金紫仙山、湖口低山区等地区,属于远源搬运,也有少量沉积物来源于盆地西侧茶陵丘陵等地区,属于近源搬运(图 6 II)。文家冲一带砾岩中的硅质岩、粉砂岩主要来源于盆地东南缘的二叠系,粉砂质泥岩来源于盆地东南缘的泥盆系,石英砂岩主要来源于盆地东南缘的二叠系、石炭系。龙门口一带砾岩中的花岗岩成分依据古流向可以断定主要来源于盆地东侧炎陵—彭公庙岩体,砾岩中的花岗岩成分依据古流向可以断定主要来源于盆地东侧炎陵—彭公庙岩

体,属于远距离搬运,灰岩、变质砂岩主要分别来源于盆地东侧的石炭—泥盆系、寒武系。龙形市一带板岩、长石石英砂岩、砂岩、硅质岩主要来源于其东侧的寒武系,粉砂岩、石英砂岩主要来源于盆地东侧前寒武系,花岗岩、花岗闪长岩主要来源于其东侧炎陵—彭公庙岩体,灰岩、燧石主要来源于其北东侧的泥盆系;金紫仙一带砾岩中的板岩、变质砂岩主要来自其南东的寒武系,砂岩主要来自于其东侧的侏罗系和泥盆系,石英砂岩、粉砂质泥岩、灰岩主要来自于其东侧的泥盆系,硅质岩主要来自于其东侧的奥陶系,花岗岩主要来自于其东边的炎陵—彭公庙岩体,粉砂质页岩主要源于其东侧的侏罗系,其中变质砂岩在越靠近湖盆中心区域其含量逐步降低。湖口—耀明脑里一带砾岩中的板岩、硅质岩成分主要来自其邻近的奥陶系,

砂岩成分依据古水流向推断主要来自北东部的泥盆系。茶陵县高陇镇小关村、火田镇茅坪山烈士陵园、火田镇五门村、腰潞镇黄头村灰岩主要来自其东侧的二叠系和石炭系,砂岩来源其东侧的泥盆系;茶陵县火田镇五门村、腰潞镇黄头村花岗岩主要来源于其南侧的高珑山(图6 II);茶陵县火田镇茅坪山烈士陵园闪长岩主要来源其东侧的泥盆系。茶陵县腰潞镇颜吴湾灰岩主要来源于其西北侧石炭系和泥盆系;砂岩主要来源于泥盆系。茶陵县腰潞镇双车村灰岩主要来源于其西侧泥盆系。茶陵县大岳村、官溪村、荷树下村灰岩主要来源于其东侧泥盆系;茶陵县大岳村、官溪村、荷树下村根据石英含量判定其砂岩主要来源于其东侧的石炭系。茶陵县下东街道头铺村灰岩、砂岩主要来源于其西侧泥盆系。

表1 茶永盆地古流向数据统计表

Table 1 Statistical table of paleocurrent data in the CYB

数据点	原始产状	校正后产状	原始产状	校正后产状	原始产状	校正后产状
	26°∠21°	7°∠19°	115°∠30°	121°∠24°	8°∠18°	347°∠19°
	63°∠33°	56°∠27°	130°∠32°	138°∠27°	45°∠25°	31°∠21°
	60°∠23°	48°∠18°	110°∠5°	242°∠3°	348°∠12°	323°∠15°
A	21°∠39°	12°∠38°	75°∠6°	330°∠2°	68°∠45°	64°∠39°
茶陵县高陇镇小关村	21°∠38°	12°∠37°	19°∠39°	10°∠38°	356°∠30°	345°∠32°
E 113°47'42"	64°∠29°	56°∠23°	51°∠10°	7°∠7°	352°∠36°	343°∠38°
N 26°57'50"	104°∠41°	106°∠34°	45°∠58°	41°∠54°	8°∠16°	344°∠17°
K _{3h}	80°∠4°	291°∠3°	56°∠36°	49°∠31°	350°∠12°	324°∠15°
S ₀ 4°∠7°	118°∠45°	121°∠39°	33°∠36°	24°∠33°	40°∠30°	29°∠26°
	94°∠42°	94°∠35°	60°∠23°	48°∠18°	5°∠30°	353°∠31°
	29°∠18°	7°∠16°	28°∠22°	10°∠20°	350°∠16°	330°∠19°
	120°∠40°	124°∠34°	67°∠17°	51°∠11°		
	330°∠10°	281°∠9°	255°∠8°	232°∠15°	353°∠55°	349°∠49°
	250°∠18°	238°∠25°	262°∠32°	253°∠37°	30°∠25°	30°∠17°
	357°∠34°	349°∠28°	264°∠12°	243°∠18°	4°∠48°	0°∠41°
B	8°∠23°	358°∠16°	184°∠62°	186°∠69°	37°∠12°	52°∠4°
茶陵县火田镇茅坪山烈士陵园	354°∠34°	346°∠28°	265°∠24°	253°∠29°	308°∠22°	288°∠22°
E 113°43'26"	335°∠22°	315°∠18°	344°∠23°	327°∠18°	312°∠16°	284°∠16°
N 26°56'13"	285°∠46°	278°∠48°	6°∠23°	355°∠16°	308°∠24°	290°∠24°
K _{2l}	358°∠14°	328°∠8°	7°∠18°	352°∠11°	320°∠31°	307°∠29°
S ₀ 299°∠8°	356°∠44°	351°∠38°	294°∠38°	284°∠39°	266°∠20°	251°∠25°
	310°∠55°	304°∠54°	340°∠8°	275°∠7°	272°∠15°	252°∠20°
	262°∠15°	245°∠21°	10°∠46°	7°∠39°	281°∠16°	259°∠20°
	277°∠10°	248°∠15°	313°∠35°	301°∠34°		

续表 1

数据点	原始产状	校正后产状	原始产状	校正后产状	原始产状	校正后产状
C 茶陵县火田镇曾家里村						
E 113°41'06"						
N 26°55'01"	334°∠26°	305°∠34°				
K_2l						
S_0 334°∠18°						
	33°∠34°	17°∠15°	324°∠22°	280°∠27°	352°∠26°	306°∠21°
	8°∠11°	257°∠13°	330°∠15°	269°∠22°	351°∠16°	277°∠17°
	26°∠20°	307°∠7°	311°∠28°	280°∠35°	346°∠18°	282°∠19°
D	6°∠10°	254°∠14°	3°∠20°	296°∠14°	246°∠26°	238°∠45°
茶陵县大岳村	84°∠115°	80°∠99°	308°∠30°	280°∠38°	343°∠20°	286°∠21°
E 113°38'27"	28°∠26°	348°∠9°	41°∠21°	343°∠2°	344°∠12°	263°∠18°
N 26°44'38"	38°∠20°	312°∠3°	335°∠28°	296°∠28°	336°∠25°	292°∠26°
K_2l	1°∠9°	251°∠15°	358°∠30°	319°∠22°	336°∠26°	294°∠26°
S_0 316°∠20°	328°∠10°	255°∠20°	320°∠24°	281°∠30°	304°∠18°	264°∠29°
	30°∠20°	309°∠6°	10°∠17°	285°∠12°	357°∠28°	314°∠21°
	26°∠16°	274°∠7°	320°∠19°	273°∠26°	315°∠24°	278°∠31°
	33°∠28°	6°∠10°	339°∠40°	314°∠36°	335°∠20°	282°∠23°
E	70°∠30°	101°∠35°	50°∠24°	96°∠25°	64°∠36°	91°∠38°
茶陵县荷树下村水库	76°∠15°	125°∠26°	136°∠20°	148°∠39°	116°∠50°	124°∠65°
E 113°35'27"	155°∠18°	158°∠38°	80°∠45°	97°∠51°	160°∠75°	160°∠95°
N 26°43'51"	202°∠33°	189°∠50°	90°∠20°	124°∠32°	79°∠30°	107°∠38°
K_2h	150°∠18°	156°∠38°	78°∠15°	126°∠26°	146°∠15°	154°∠35°
S_0 251°∠20°	128°∠20°	144°∠38°	86°∠15°	129°∠28°	112°∠68°	116°∠82°
	154°∠14°	158°∠34°	148°∠26°	153°∠46°		
	88°∠16°	332°∠12°	73°∠38°	38°∠25°	101°∠30°	62°∠9°
	46°∠25°	355°∠27°	80°∠25°	13°∠14°	110°∠20°	318°∠4°
F	120°∠22°	253°∠3°	65°∠13°	328°∠18°	130°∠18°	260°∠8°
茶陵县下东街头铺村	76°∠10°	317°∠17°	90°∠16°	331°∠12°	92°∠18°	339°∠10°
E 113°30'28"	60°∠15°	335°∠20°	120°∠16°	285°∠8°	28°∠20°	338°∠30°
N 26°47'02"	80°∠19°	348°∠14°	90°∠28°	34°∠12°	5°∠20°	328°∠36°
K_2l	102°∠20°	340°∠6°	73°∠15°	334°∠16°	25°∠24°	343°∠33°
S_0 25°∠24°	55°∠28°	5°∠26°	71°∠10°	318°∠18°	54°∠14°	331°∠21°
	15°∠45°	355°∠53°	350°∠26°	326°∠44°	85°∠40°	57°∠22°
	78°∠25°	12°∠15°	28°∠12°	323°∠26°	75°∠20°	352°∠15°

(3)E:这一时期所收集的沉积物源数据比较有限,但由砾岩成分可以推断这一时期的沉积物主要来源于盆地北侧的湖口低山区、西侧的茶陵丘陵和茶陵低山区等地区(图6 III)。茶陵县枣市镇大湾里砾石成分中的白云岩主要来源于豪冲北东侧的石炭系,石英砂岩、灰岩、粉砂岩主要来源于豪冲北东侧的石炭系和泥盆系,具体层位需要借助测年等

手段。茶陵县茶陵南站灰岩主要来源于其西侧的泥盆系,砂岩主要来源于其西侧的寒武系。

2.3 沉积古地理面貌

(1)K₁:盆地处于湖盆演化的初始阶段,主要沉积区位于湘荫渡—鲤鱼塘一带以南地区,其沉积中心位于东南部栖凤渡—文家冲一带,主要以浅湖相沉积为主,沉积范围主要受逆断层(F₁、F₂)、正断层

表2 物源分析采集的数据点及砾石成分一览表

Table 2 Provenance analysis data and component of conglomerate gravels

时代	采集数据点	砾石成分	资料来源
K ₁	永兴县垅塘坪	①石英砂岩 33%、长石石英砂岩 27%、粉砂岩 29%、脉石英 11%(图 6 I 中 f) ②脉石英 35%、长石砂岩 35%、石英砂岩 30%(图 6 I 中 e)	本文实测
	郴县砦口镇瓦窰坪村	①以石英砂岩、粉砂岩为主,其次为硅质岩和脉石英(图 6 I 中 a) ②以砂岩、硅质岩、脉石英为主,次为灰岩、粉砂岩等(图 6 I 中 d) ③以脉石英、硅质岩为主,少量砂岩(图 6 I 中 b)	湖南省地质调查院, 2005
	郴县大面洲—陈家冲	主要为灰岩,次为石英、砂岩、燧石(图 6 I 中 c)	湖南省区域地质测量队, 1969
K ₂	永兴县龙形市乡	①砂岩 24%、脉石英 25%、石英砂岩 24%、板岩 7%、花岗岩 5%、灰岩 6%、硅质岩 5%、燧石 4%(图 6 II 中 d) ②长石砂岩 15%、砂岩 18%、粉砂岩 16%、长石石英砂岩 20%、石英砂岩 18%、脉石英 7%、板岩 6%(图 6 II 中 e) ③粉砂岩 22%、砂岩 18%、石英砂岩 16%、长石砂岩 17%、少量脉石英 8%、板岩 8%、泥岩 11%(图 6 II 中 f) ④砂岩 15%、石英砂岩 15%、长石石英砂岩 15%、长石砂岩 14%、细砂岩 14%、板岩 6%、硅质岩 5%、脉石英 8%、钙质砂岩 8%(图 6 II 中 g) ⑤石英砂岩 24%、粉砂岩 27%、砂岩 23%、长石石英砂岩 9%、脉石英 9%、花岗闪长岩 8%(图 6 II 中 h) ⑥长石砂岩 39%、石英砂岩 35%、脉石英 9%、花岗岩 9%、粉砂岩 8%(图 6 II 中 i)	本文实测
	砦口镇瓦窰坪村	①以脉石英为主,次为硅质岩和少量石英砂岩、粉砂岩(图 6 II 中 b) ②以细粒石英砂岩为主,次为硅质岩、粉砂岩、粉砂质泥岩及少量脉石英(图 6 II 中 a)	湖南省地质调查院, 2005
	安仁县关王庙—下洞	①以石英砂岩岩屑石英砂岩、变质砂岩为主,少量泥质粉砂岩、粉砂质页岩、硅质岩,偶见灰岩和花岗岩(图 6 II 中 j) ②以砂岩为主,硅质岩、脉石英次之,偶见灰岩砾(图 6 II 中 k) ③以砂岩为主,板岩次之,少量硅质岩和脉石英(图 6 II 中 l)	湖南省地质调查院, 2005
	安仁高坊	变质砂岩(70%)、脉石英、石英岩(18%)、燧石(3%)、泥质岩、千枚岩、板岩(9%)(图 6 II 中 m)	中南矿冶学院地质系红层科研小组, 1975
	安仁红岩公社水口山	变质砂岩(70%)、石英岩、脉石英(26%)、燧石(1%)、板岩(2%)(图 6 II 中 n)	
	东冲村—大坑	①以变质砂岩、板岩为主(图 6 II 中 o) ②以硅质岩、砂岩为主(图 6 II 中 p)	刘芮岑, 2018
	茶陵县高陇镇小关村	石英 35%、灰岩 15%、砂岩 20%、板岩 30%(图 6 II 中 q)	
	茶陵县火田镇茅坪山烈士陵园	灰岩 35%、石英 25%、砂岩 20%、火山碎屑岩 10%、闪长岩 10%(图 6 II 中 r)	
	茶陵县火田镇五门村	石英 18%、灰岩 22%、花岗岩 7%、砂岩 50%、燧石 3%(图 6 II 中 s)	
	茶陵县腰潞镇黄头村	石英 33%、岩石岩屑 40%、灰岩 10%、砂岩 20%、花岗岩 2%(图 6 II 中 t)	
茶陵县腰潞镇颜吴湾	石英 45%、砂岩 45%、灰岩 10%(图 6 II 中 u)	本文实测	
茶陵县腰潞镇双车村	石英 80%、灰岩 20%(图 6 II 中 v)		
茶陵县大岳村	砂岩 65%、石英 20%、灰岩 15%(图 6 II 中 w)		
茶陵县官溪村	石英 50%、长石 30%、砂岩 15%、灰岩 5%(图 6 II 中 x)		
茶陵县荷树下村	石英 50%、砂岩 20%、灰岩 30%(图 6 II 中 y)		
茶陵县下东街道头铺村	①灰岩 80%、砂岩 20%,偶含石英、方解石(图 6 II 中 z) ②灰岩 50%、砂岩 50%,偶含石英(图 6 II 中 a)		
E	茶陵县枣市镇大湾里	①以灰岩、石英砂岩为主,其次为白云岩、粉砂岩、泥岩(图 6 III 中 a) ②以灰岩为主,石英砂岩次之,少量白云岩、泥岩(图 6 III 中 b)	湖南省地质调查院, 2005
	茶陵县茶陵南站	灰岩 80%、砂岩 20%,偶含石英(图 6 III 中 c)	本文实测

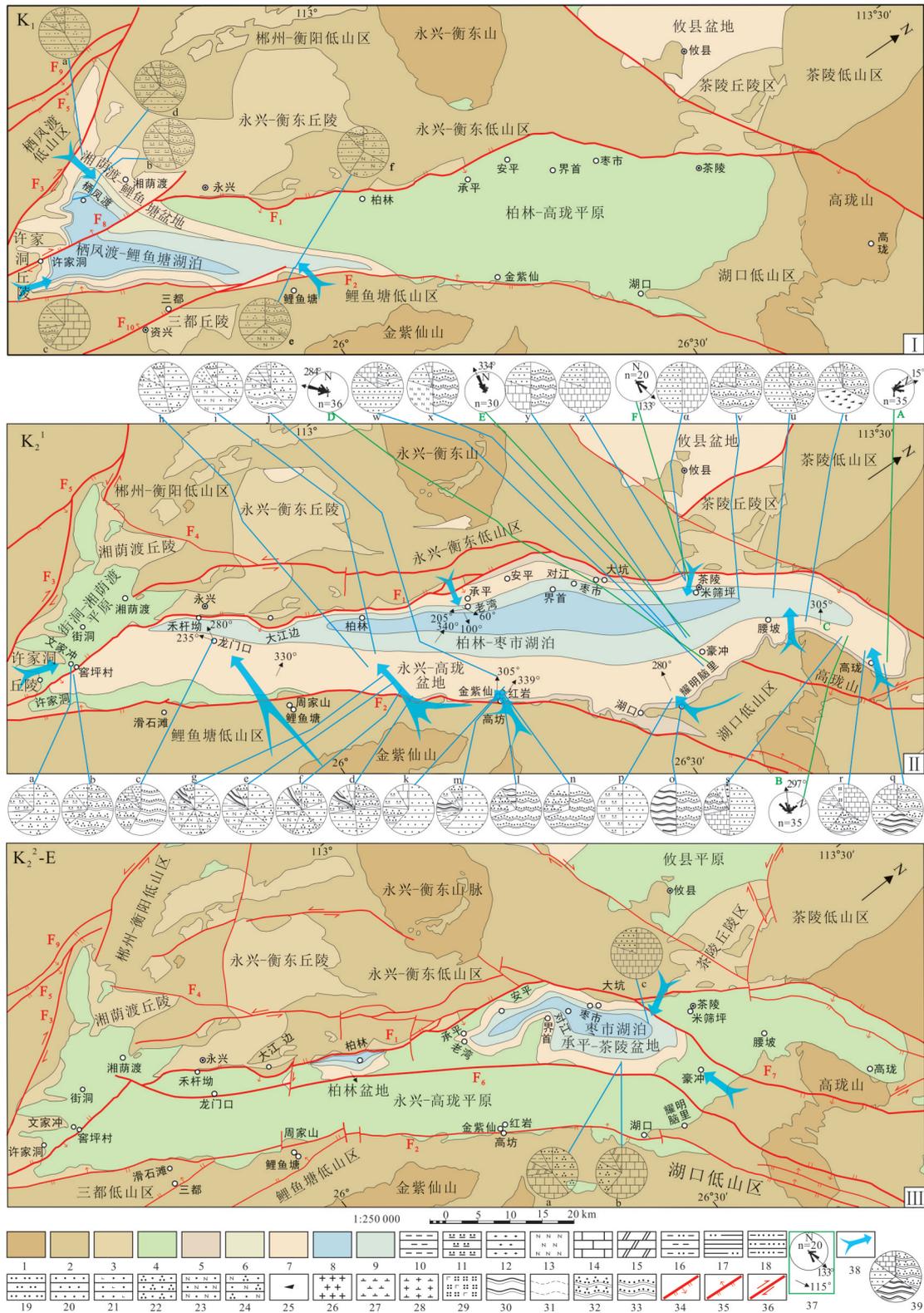


图6 茶永盆地白垩纪—古近纪古地理图

Fig. 6 Cretaceous-Paleogene paleogeography of the CYB

1. 高山; 2. 低山; 3. 丘陵; 4. 平原; 5. 坡积相; 6. 三角洲平原相; 7. 盆地; 8. 浅湖; 9. 滨湖; 10. 泥岩; 11. 硅质岩; 12. 燧石; 13. 长石; 14. 灰岩; 15. 白云岩; 16. 粉砂质泥岩; 17. 粉砂质页岩; 18. 泥质粉砂岩; 19. 粉砂岩; 20. 砂岩; 21. 钙质砂岩; 22. 石英砂岩; 23. 长石砂岩; 24. 长石石英砂岩; 25. 岩屑; 26. 花岗岩; 27. 闪长岩; 28. 花岗闪长岩; 29. 玄武质火山碎屑岩; 30. 板岩; 31. 千枚岩; 32. 石英岩、脉石英; 33. 变质砂岩; 34. 正断层; 35. 逆断层; 36. 走滑断层; 37. 古流向; 38. 物源方向; 39. 物源饼图

(F_5 、 F_8 、 F_9 、 F_{10})、走滑断层 F_3 及未知性质断层 F_4 共同控制(图6 I)。此阶段盆地为主要受正断层和走滑断层共同控制的断陷—拉分盆地。依据剖面a、b(图2)可将演化过程细分为两个阶段:第一阶段茶永盆地南缘下沉,根据栏垅组的发育范围(图1),推断盆地沉积范围主要由一系列正断层控制,主要发育于栖凤渡一带(图7 B中 I),随后盆地进一步下降,沉积范围扩大到整个湘荫渡—鲤鱼塘盆地,在盆地东南缘发育坡积相底砾岩,盆地中心发育栖凤渡—鲤鱼塘湖泊,由栖凤渡—鲤鱼塘低山区、许家洞丘陵等地区提供沉积物源;第二阶段湘荫渡—鲤鱼塘盆地隆升,在栖凤渡一带发育三角洲平原相(图6 I),下部岩层形成浅色层,局部地段见天然沥青和沥青化植物碎片,可以推断本阶段开始时出现过短暂的潮湿期,本阶段与上下部地层为连续沉积。

(2) K_1^2 :在早、晚白垩世之交盆地内部发生了一次规模较大的构造运动,形成了主要受逆断层 F_1 、 F_2 控制的断陷盆地。茶永盆地的沉积中心逐渐北移,形成永兴—高珑盆地。湘荫渡—鲤鱼塘盆地为平原区,盆地四周上升剧烈,剥蚀强度大,鲤鱼塘低山区、湖口低山区、金紫仙山等地区成为盆地的物源区,在盆地边缘广泛沉积坡积相底砾岩,盆地发育洪积相岩石组合。晚白垩世晚期,盆地西部的下降速度明显加快,由于东亚大陆边界的高原山系隆升导致白垩纪华南东部是古高地(Wang Y et al., 2020),因而在盆地西部发育柏林—枣市湖泊,在湖泊中发育湖泊相岩石组合,盆地东部提供物源(图6 II)。

(3) K_2^2 -E:晚白垩世末期—古近纪形成逆断层 F_6 和正断层 F_7 两条断裂,与逆断层 F_1 共同限制了盆地的沉积范围(图6 III),此时为坳陷盆地,具单面断陷盆地特征。盆地的沉积范围逐步收缩,形成两个孤立的盆地——柏林盆地、承平—茶陵盆地,在两个盆地中可能均有湖泊发育,主要由盆地北侧的湖口低山区、盆地西侧的茶陵丘陵区、永兴—衡东低山区等地提供沉积物源,由于古近纪古新世干燥的古气候条件,盆地结束沉积,在盆地中发育有蒸发岩。

3 讨论

茶永盆地位于华南大陆南岭构造带北缘,白垩

纪—古近纪发生了一系列构造、气候、岩浆侵入与喷发事件,基于上文的研究并综合近年来前人研究成果来讨论这些事件和盆地沉积演化之间的耦合关系。

3.1 构造事件对盆地沉积演化的影响

自白垩纪以来,古太平洋板块的运动方向发生了数次变化, Li J H et al. (2014)对华南大陆白垩纪受力情况进行了系统讨论, Xu X B et al. (2021)对茶永盆地演化过程中的力学特征进行了系统讨论,本文分为早白垩世、晚白垩世早期、晚白垩世晚期—古近纪三个阶段对茶永盆地进行讨论。

(1)早白垩世古太平洋板块向海后退(Zhou X M et al., 2006)或者下沉(Li X H et al., 2007)(图7 A)导致扬子板块与华夏板块缝合处的控盆逆断裂 F_6 、 F_7 (图7 B)再度活跃,华南发生NW-SE伸展,故茶永盆地形成了NW-SE水平最小主应力和垂直最大主应力的伸展构造体系。早白垩世中期,在前白垩纪正断层 F_5 、 F_8 、 F_9 、 F_{10} 及走滑断层 F_3 的共同控制下,在茶永盆地西南缘栖凤渡一带沉积栏垅组(图7 B中 I);随后在正断层 F_5 、走滑断层 F_3 、逆断层 F_2 的共同控制下,在盆地西南缘栖凤渡—永兴一带沉积神皇山组(图7 B中 II),呈簸箕状(Shu L S et al., 2009),主要由茶永盆地南侧的鲤鱼塘低山区、许家洞丘陵、栖凤渡低山区等地区提供沉积物源。早白垩世晚期古太平洋板块俯冲华南的角度发生变化或菲律宾微大陆和亚洲大陆之间的碰撞(Li J H et al., 2012)(图7 A),华南发生NW-SE压缩,茶永盆地形成了南北向水平最大主应力和东西向水平最小主应力的走滑构造体系,盆地西南部栖凤渡—永兴一带逐步抬升成街洞—栖凤渡平原。

(2)晚白垩世早期古太平洋板块俯冲方向以缓慢的速度从NNW转变为NWW,并形成后退式俯冲(图7 A),华南发生NWW-SEE向伸展,茶永盆地形成了NW-SE向水平最小主应力和垂直最大主应力的伸展构造体系,在逆断层 F_1 、 F_2 的控制下,盆地沉积中心开始北移,伴随发生大规模沉积(图7 B中 III),盆地沉积物源主要由盆地东西两侧的永兴—衡东丘陵—低山区、茶陵丘陵—低山区、高珑山、金紫仙山、湖口—鲤鱼塘低山区等地区提供。南海NEE向逆冲断层(Ye Q et al., 2018)的存在则证明

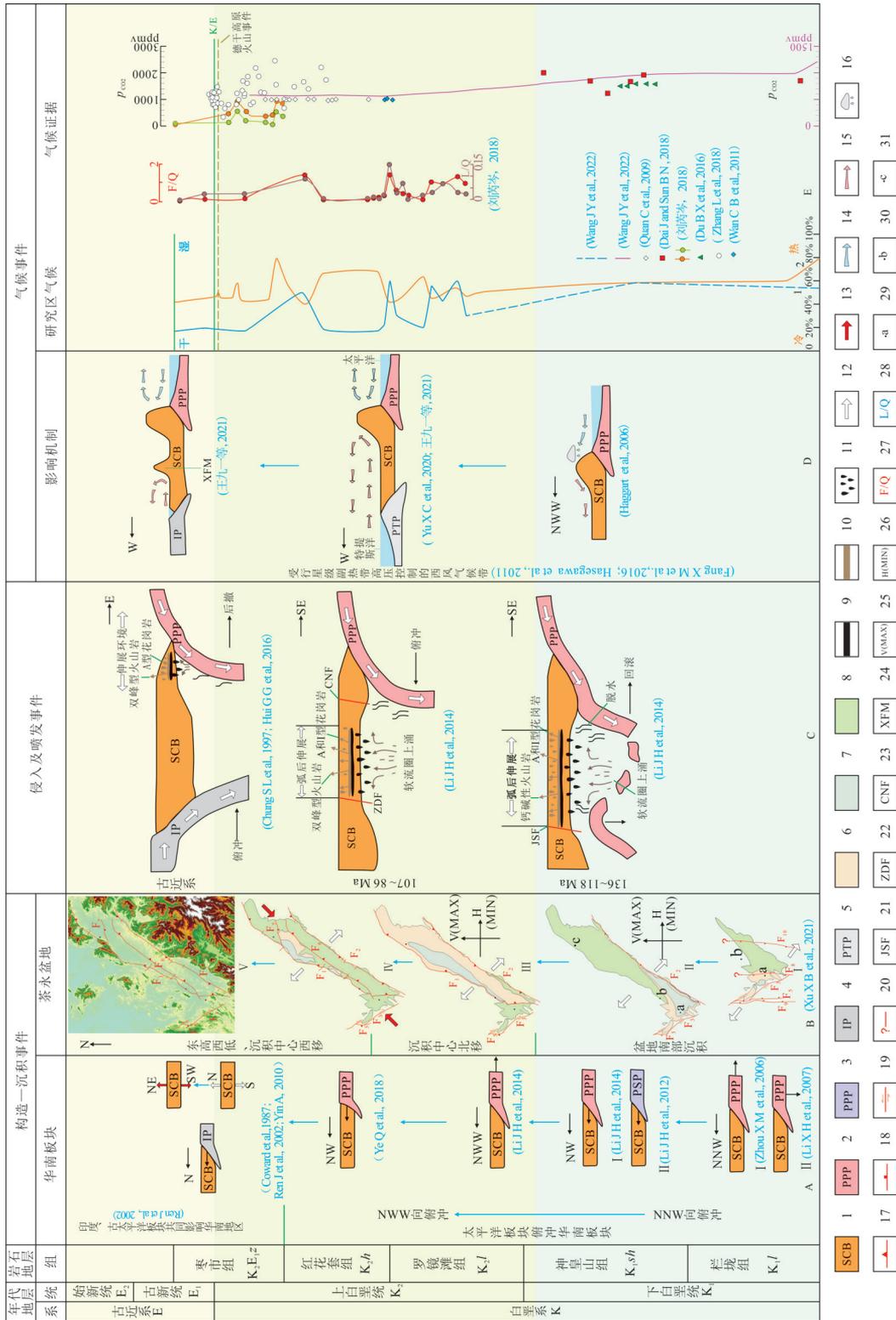


图 7 茶永盆地沉积古地理演化与构造、岩浆、气候等地质事件的综合对比

Fig. 7 Comprehensive evolutionary comparison of sedimentary paleogeography in the CYB with regional tectonic, magmatic and climatic events

1. 华南; 2. 古太平洋板块; 3. 非律宾海微板块; 4. 印度板块; 5. 古特提斯洋板块; 6. 盆地沉积区; 7. 湖相沉积区; 8. 挤压流; 9. 玄武岩地壳; 10. 部分熔融; 11. 拉张力; 12. 挤压力; 13. 冷气流; 14. 暖气流; 15. 降水; 16. 逆断裂; 17. 正断裂; 18. 走滑断裂; 19. 推测断层; 20. 政和-大埔断裂; 21. 江绍断裂; 22. 政和-大埔断裂; 23. 长乐-南澳断裂; 24. 雪峰山; 25. 垂直最大主应力; 26. 水平最小主应力; 27. 长石/石英; 28. 岩屑/石英; 29. 栖风渡; 30. 永兴; 31. 秦陵

到晚白垩世晚期古太平洋板块NW向高角度俯冲于华南(图7A),华南发生NWW-SEE向压缩,茶永盆地形成了NW-SE向水平最大主应力和NE-SW向水平最小主应力的走滑构造体系,由于盆地东部隆升速度大于西部,因此沉积中心进一步西移至柏林—界首一带,发育柏林—枣市湖泊(图6II),盆地沉积物源主要由盆地东侧的高瓏山、湖口—鲤鱼塘低山区提供。

(3)晚白垩世晚期-古近纪印度板块向北俯冲于华南大陆(Coward, et al., 1987)(图7A),印度板块与古太平洋板块共同影响华南地区(Ren J Y et al., 2002),使其发生NS向挤压(Li J H et al., 2014),茶永盆地构造体系未发生大的转变,但在盆地内部发育逆断层 F_6 ,与逆断层 F_1 共同控制着盆地的沉积范围(图7B中IV),沉积范围进一步西移,柏林—界首湖泊形成两个独立的盆地,即柏林盆地和承平—茶陵盆地(图6III),主要由盆地北侧的湖口低山区、盆地西侧的茶陵丘陵区、永兴—衡东低山区等地区提供沉积物源。古近纪晚期印度板块与亚洲大陆碰撞(Yin A, 2010)(图7A)的远程效应使得华南发生NE-SW向挤压,在盆地区域形成了NE-SW向水平最小主应力和垂直最大主应力的伸展构造体系(宋博文等, 2020),但是这个阶段的构造作用对盆地沉积影响不大。根据地层中的蒸发岩、古 CO_2 浓度(pCO_2)(图7E)推断湖泊沉积演化的最后阶段是在干燥的古气候控制下结束的,晚渐新世之前,华南东部的地形高于邻近地区,由于印度板块对亚欧大陆碰撞使得青藏高原发生强烈的地壳增厚和隆升,导致华南整体地势发生反转,形成西高东低的现代地貌格局,导致长江和珠江向东流入太平洋(Wang Y, 2020)。当古太平洋板块NW向俯冲亚欧板块时,板片之间围限了一个软流圈域,当印度—亚洲大陆的碰撞发生时,加厚的岩石圈根会迫使软流圈向东或向东南方向流动,导致西太平洋边缘海盆地发育区的东部边界均表现为向东或向南东的弧形凸出(任建业和李思田, 2000)。

3.2 侵入与喷发事件对盆地沉积演化的影响

根据对中生代火成岩的研究,古太平洋板块对华南的俯冲开始于晚二叠纪或者早侏罗世(Zhou X M, 2006),约170 Ma之后华南由主要受古特提

斯洋板块控制转变为主要受古太平洋板块控制(骆满生等, 2014),岩石圈开始减薄,软流圈和岩石圈处于相对平衡的状态被破坏,岩浆在软流圈中的物质与能量影响下通过断裂上涌到岩石圈(李佳奇等, 2021),形成了一个覆盖面积达139920 km²的NE向岩浆弧。幕式俯冲—回撤的太平洋板块以SW向回撤为主,导致白垩纪时期岩浆活动由内陆东南向沿海迁移(Liu L et al., 2014),侵入活动主要分布在江绍断裂以东。根据测年数据、岩石学和地球化学资料可以将华南白垩纪岩浆演化分为三个阶段(Li J H et al., 2014),主要以喷发岩为主(Cao X Z et al., 2021)。

第一阶段(145~137 Ma):主要分布于长江中下游及沿海一带(Chen J Y et al., 2013; Gan C S et al., 2017),由于太平洋板块的低角度俯冲及其下沉、回滚,在断裂处形成弧后伸展构造环境(Ling M X et al., 2009; 张岳桥等, 2012),华南地区同时发育断陷盆地和发生岩浆侵入和喷发作用(Zhou X M et al., 2006; Shu L S et al., 2009)。在长江中下游地区,侵入岩主要为闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩(Yang W and Zhang H F, 2012; Xie J C et al., 2012),源于俯冲海洋地壳的部分熔融(Xie J C et al., 2012);同期喷发岩的分布要少得多,主要分布在香港、浙江和江西一带,主要由玄武岩、火山凝灰岩、熔岩和流纹岩组成(刘飞宇等, 2009),为地壳熔融和壳幔衍生熔体相互作用的产物(Guo F et al., 2012)。

第二阶段(136~118 Ma):主要为A型花岗岩(Qin Y et al., 2022)和钙碱性火山岩,俯冲板块及其有关块体的回滚(Gorczyk, et al., 2007)、软流圈强烈上涌、俯冲板块的下沉及在较高地幔温度下加剧脱水(Peacock and Wang K, 1999)导致大陆岩石圈地幔减压熔融和岩石圈变薄,爆发燕山期最大规模的岩浆侵入活动,分布于长江下游地区(Gan C S et al., 2017)和江山—绍兴断裂以东(Yang S Y et al., 2011, 2012),以花岗闪长岩、闪长岩和二长花岗岩为主(Wu F Y et al., 2012; Yang W and Zhang H F, 2012),且由元古代基岩的部分熔融产生,少量来源于地幔熔体(Wong J et al., 2011; Yang W and Zhang H F, 2012)。火山岩由流纹岩、英安岩、玄武

岩和凝灰岩组成,为过铝质钙碱性岩石,是新元古代-中元古代地壳部分熔融与幔源熔体混合的产物(侯可军和袁顺达, 2010; Guo F et al., 2012)。117~108 Ma 华南发生NW-SE向挤压运动,为岩浆的休止期(Li J H et al., 2012, 2014)。

第三阶段(107~86 Ma):主要为A型和I型花岗岩和双峰型火山岩(Gan C S et al., 2017; Wu C H et al., 2022),花岗岩类由花岗闪长岩、花岗岩和闪长岩组成,主要分布在长乐—南澳断裂与政和—大浦断裂之间的弧后环境中(Wong J et al., 2011; Liu Q et al., 2012),可能来源于由地壳部分熔融和少量地幔衍生熔体的组成体(Liu Q et al., 2012; 贾小辉等, 2014),形成于古太平洋俯冲块体的SEE向后撤(Li B et al., 2015)。这一阶段的火山岩由流纹岩、英安岩和玄武岩组成,沿沿海地区构成双峰组合,嵌套红层或与相关花岗岩侵入体密切相关(Guo F et al., 2012)。A型和I型花岗岩类与双峰火山岩序列的成对出现,证明晚白垩世存在显著的伸展作用(Zhou X M et al., 2006; Li J H et al., 2014)。

湖南燕山期花岗岩类总体具有富硅,高钾、钠,贫铁、钛的特点。湘南地区玄武岩类形成于198~81 Ma之间,属侏罗纪-白垩纪,主要岩石类型包括碱性玄武岩和拉斑玄武岩(赵振华等, 1998);汝城横山—江头芳一带主要为辉绿岩,全岩K-Ar法年龄为112 Ma,为早白垩世;湖南省东部以辉绿岩和辉绿玢岩为主,全岩K-Ar法同位素年龄介于91~81 Ma之间,为晚白垩世;衡南雅江和龙王形两地玄武岩全岩K-Ar法年龄分别为70.1 Ma、71.8 Ma(湖南省地质调查院, 2005),衡南冠市街、江口镇白垩纪玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为71.0±0.9 Ma、71.3±0.8 Ma(Meng L F et al., 2012),可能是玄武岩受后期断裂影响发生较强蚀变,造成年龄偏低,故将岩体的形成时间定为早白垩世。茶永盆地内部及其周围区域基本没有发生岩浆喷发活动,但岩浆在深部热量的驱动力下沿着茶-郴大断裂向上运移,发生岩浆喷发活动,在活动区域产出似层状玄武岩,在盆地演化过程中主要出露于衡南县冠市街—耒阳市春江铺—雅江一线,岩石主要有玻基辉橄岩、橄榄拉斑玄武岩、石英拉斑玄武岩和碱性玄武岩、辉长辉绿岩、橄榄拉斑辉绿岩、拉斑玄武岩。

古近纪亚欧大陆东移,古太平洋板块后退,在亚欧大陆东缘形成伸展构造环境,在中国东北、俄罗斯远东、日本、韩国等地,早期侵入岩属于I型花岗岩类,晚期为埃达克质岩石(Tang J et al., 2018)。华南东侧岩浆岩主要分布于东南沿海区域,为A型花岗岩类与双峰型火山岩(Chung S L et al., 1997),火山岩为拉斑玄武岩和粗面岩、流纹岩组合,是由岩石圈减薄,地幔物质熔融至软流圈浅层上涌形成(Hui G G et al., 2016),华南西侧由于印度板块的俯冲、副特提斯洋的后撤发生了一系列复杂的岩浆、火山活动,在此不再详述。湖南省岩浆岩主要受晚白垩世走滑型断裂控制,主要呈岩带或岩群集中出露于长寿街—双牌深大断裂的两侧,仅见宁乡青华铺、浏阳应家山等地,宁乡青华铺火山岩属玄武安山岩,浏阳应家山古新世火山岩由玄武岩和碱玄武岩组成,K-Ar年龄为62.1±0.9 Ma,属亚碱性玄武岩(湖南省地质调查院, 2005)。

3.3 气候事件对盆地沉积演化的影响

白垩纪—古近纪盆地的沉积演化不仅受构造事件的影响,而且在红层的沉积演化过程中也深受气候事件的影响。

早白垩世期间,中国大陆形成了一个受行星级副热带高压控制的西风气候带,处于干热的气候环境下,早白垩世晚期受太平洋板块俯冲的影响,东南沿海地区发生一定的隆起,在华南内部形成雨影效应(Haggart et al., 2006),燕山山脉的隆起造就了中国北部湿润温暖、南部干旱半干旱的气候格局(Cao K, 2018)。根据孢粉化石生物气孔重建的 $p\text{CO}_2$ (Du B X et al., 2016; Dai J and Sun B N, 2018),茶永盆地的气温在早白垩世中期出现了短暂的下降,然后开始一段漫长的温暖期(图E7中2);根据孢粉化石组合建立的SEG(孢粉生态群)模型分析了茶永盆地湿润状况(Wang J Y et al., 2022),认为盆地开始一直较湿润,在早白垩世晚期干旱程度逐渐增强(图7E中1)。

晚白垩世早期,东亚发生了一次大规模的NW-SE缩短事件,南岭山脉、武夷山、黄山、雪峰山、秦岭-大别山脉、吕梁山脉、长白山等迅速抬升形成山脉(Yang Y T, 2013),阻挡了海洋中的水分并封闭了断陷盆地,导致了干旱沙漠环境的形成,

亚洲大陆和古太平洋之间形成了热差异(Yu X C et al., 2020),华南内部降水被热差异导致的西风携带古特提斯洋的暖气团控制(王九一等, 2021),在运移过程中受到东部高原阻挡形成降水,随着雪峰山、南岭等山脉的进一步隆升,阻挡了来自新特提斯洋的暖气团,气候进一步干燥,在古纬度 $25.5^{\circ} \sim 46.1^{\circ}N$ 处形成了沙漠盆地(包括衡阳盆地和醴攸盆地)(Hasegawa et al., 2011),Maastrichtian末期德干高原火山活动喷发的 CO_2 导致了一次全球变暖事件,之后到K-E界线全球古气候又发生显著的变冷,导致大规模生物灭绝。晚白垩世茶永盆地气候主要参考了碎屑指数(刘芮岑, 2018)与古 pCO_2 (Quan C et al., 2009; Wan C B et al., 2011; 刘芮岑, 2018; Wang J Y et al., 2022),碎屑指数长石(F)/石英(Q)值越大代表古气候越干冷,白垩纪推算的古温度数据和 pCO_2 都存在强烈的正相关性(Wang Y D et al., 2014),虽然测试样品、建模参数不同,导致了具体数据有很大差距,但是最终 pCO_2 变化趋势一样,晚白垩世早期根据F/Q值可以看到茶永盆地的温度波动性很大,但总体是由温暖变为较炎热(图7E中2),由较湿润逐步变干旱(图7E中1),晚白垩世根据 pCO_2 变化趋势发现茶永盆地气温由较炎热变为凉爽,但是局部会出现炎热气温,在晚白垩世Maastrichtian期以温凉气候为主,期间出现一个短暂的温热期(Quan C et al., 2009)(图7E中2),根据F/Q值发现晚白垩世晚期气候由早期的干旱快速变为湿润,然后又逐步变干旱(图7E中1),这一古气候特征符合盆地的演化趋势,晚白垩世晚期的干热气候条件有利于蒸发岩在湖泊中沉积,68~65 Ma德干高原出现大规模火山活动,由于刘芮岑(2018)所模拟出来的 pCO_2 并未反映这一变化趋势,根据松辽盆地钙质古土壤模拟出来的 pCO_2 可以清晰的反映出这一迅速增温变化(Zhang L M et al., 2018),随后就是一个短暂的迅速降温过程(图7E中2)。

晚白垩世晚期印度板块向北俯冲于亚欧大陆之下,导致青藏高原开始隆升、新特提斯洋的逐步闭合,在古新世使得湖盆进入干燥气候期(王九一等, 2021)。早始新世的古地理和温暖条件保持了相对较弱的海陆热对比,致使中国大部分地区为干燥的沙漠和草原气候,中国西部至东部的年降水量小

于800 mm(Zhang Z et al., 2012),茶永盆地气候的干燥程度进一步加强,使得盆地内部发育石膏、泥灰岩等蒸发岩,始新世晚期西太平洋副热带高压向西延伸,夏季南风增强引起中国东部降水量增加,迫使沙漠/草原气候向西退缩(Li X Y et al., 2018)。但也有模拟认为在始新世青藏高原的迁移对中亚干旱化有明显影响,对东亚降水和季风影响不大(Zhu C et al., 2019),根据抚顺地区孢粉化石,推断东亚季风在中始新世晚期明显增强(Quan C and Liu Y S, 2011)。气候模拟认为晚渐新世随着青藏高原的隆起、副特提斯洋的闭合和南海的扩张使得海陆热力差异扩大,使得华南地区从西风带格局的半沙漠环境转变为东亚季风气候的常绿阔叶林环境(Zhang Z S et al., 2007),导致东南亚和东亚降水增加(Molnar et al., 1993),夹杂蒸发岩的红层沉积得以终止(Wang Y, 2020)。根据古近纪华南的气候控制机制以及生物浅穴内部充填的菱面体方解石颗粒,可以断定刘芮岑(2018)模拟的 pCO_2 更能反映这一阶段的古气候状况,因此茶永盆地古新世为温凉的古气候环境(张清如, 2009; 刘芮岑, 2018)(图7E中1、2),若 $F/Q > L/Q$,则表示沉积演化以气候控制为主(江瑶等, 2021),通过盆地演化末期的F/Q、L/Q比值,我们可以得知茶永盆地的演化结束于温凉干燥的古气候环境(图7E)。

4 结论

以茶永盆地实测剖面资料和区域沉积古流向和物源数据为基础,综合对比已有的研究成果,探讨了茶永盆地的古地理演化及其控制因素,得到了以下结论:

(1)根据茶永盆地的岩石组合、地层序列及沉积构造特征,将盆地地层序列自下而上划分为栏垅组(K_{1l})、神皇山组(K_{1sh})、罗镜滩组(K_{2l})、红花套组(K_{2h})和枣市组($K_{2E,z}$)5个地层单元;识别出坡积相、洪积相、三角洲平原相和湖泊相4个沉积相类型,其中湖泊相细分为滨湖亚相和浅湖亚相。

(2)通过分析古流向、砾石成分数据,盆地沉积演化过程中主要物源区为盆地周缘低山丘陵区,早白垩世物源来自于盆地南部的栖凤渡—许家洞低

山丘陵和东部的鲤鱼塘低山区等地区,晚白垩世早期物源主要来自于盆地东侧的鲤鱼塘—湖口低山区、高珑山、金紫仙山等地区,少数来自于盆地西侧的茶陵丘陵区、永兴—衡东低山区,晚白垩世晚期—古近纪物源区为西侧的湖口低山区、北侧的茶陵丘陵区、永兴—衡东低山区等地区。

(3)古流向、沉积物源和控盆断裂分析认为茶永盆地沉积古地理演化分为三个阶段:在早白垩世时期,盆地南缘受正断层和走滑断层控制发育断陷—拉分盆地,形成近源快速堆积的坡积相和滨湖相;到晚白垩世早期,受盆缘两侧逆冲断层控制,沉积中心向西北迁移,东高西低的地貌格局使得盆地西部成为沉降中心,为最大的湖盆扩张期,形成坳陷盆地;至晚白垩世晚期—古近纪,盆地沉降中心转移到盆地西缘并收缩形成两个孤立的湖盆,最终受逆冲断层和走滑断层的控制萎缩消亡。

(4)华南中—新生代沉积盆地的记录可以响应构造、岩浆和气候事件,也为区域地貌演化和沉积矿产的形成提供支撑。茶永盆地沉积古地理演化不仅响应了太平洋板块和印度板块俯冲作用在华南内部的远程效应,使得构造体制发生伸展—挤压—走滑的三次转变,而且区域内发生的沉积、岩浆、火山事件和季风起源与构造背景存在耦合关系,东亚季风起源于晚白垩世末期—古近纪印度—亚欧板块碰撞造成青藏高原隆升和副特提斯洋闭合。

野外工作中,华兆阳和王梦丽给予了很大帮助;论文撰写过程中,徐先兵老师给予古流向校正方面的指导并开展了有益的讨论;论文审稿专家提出了宝贵的建议和意见,在此一并表示诚挚谢意。

参考文献

陈云华.2008.中国东南地区晚白垩世沉积响应与古气候[D].成都理工大学硕士学位论文,1-59.

侯可军,袁顺达.2010.宁芜盆地火山-次火山岩的锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义[J].岩石学报,26(3):888-902.

湖南省地质调查院.2005.1:25万衡阳市幅区域地质调查报告[R].

湖南省地质调查院.2012.中国区域地质志·湖南志[M].北京:地质出版社.

湖南省革命委员会地质局区域地质测量队.1965.1:20万攸县幅区域地质报告[R].

湖南省革命委员会地质局区域地质测量队.1969.1:20万郴县幅区域地质报告[R].

湖南省革命委员会地质局区域地质测量队.1970.1:20万永兴幅区域地质报告[R].

黄乐清,黄建中,罗来,王先辉,刘耀荣,梁恩云,马慧英.2019.湖南衡阳盆地东缘白垩系风成沉积的发现及其古环境意义[J].沉积学报,37(4):735-748.

贾小辉,王晓地,杨文强,牛志军.2014.粤北雪山嶂A型花岗岩的形成时代、地球化学特征及其成因[J].矿物岩石,34(3):40-49.

江瑶,刘雪敏,时志强,李建亭,王燕燕.2021.中国陆相白垩纪—古近纪(K/Pg)界线研究综述[J].桂林理工大学学报,41(3):484-496.

李佳奇,彭荣华,胡祥云,赵军.2021.湘东南永兴地区上地壳电性结构及其地质意义[J/OL].地球科学.https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211223.1041.010.html.

刘飞宇,巫建华,刘帅.2009.赣杭带早白垩世粗面岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及其意义[J].东华理工大学学报(自然科学版),32(4):330-335.

刘芮岑,李祥辉,胡修棉.2018.湖南茶陵盆地晚白垩世古降水氧同位素[J].沉积学报,36(6):1169-1176.

刘芮岑.2018.湖南茶陵盆地晚白垩世—古新世古气候分析[D].南京大学硕士学位论文,1-65.

骆满生,卢隆桥,贾建,王盛栋,徐亚东,何卫红.2014.中国中生代沉积盆地演化[J].地球科学——中国地质大学学报,39(8):954-976.

任建业,李思田.2000.西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景[J].地学前缘,7(3):203-213.

舒良树,周新民,邓平,余心起,王彬,祖辅平.2004.中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J].地质通报,23(9-10):876-884.

宋博文,张克信,徐亚东,侯亚飞,季军良,骆满生.2020.中国古近纪构造-地层区划及地层格架[J].地球科学,45(12):4352-4369.

童永生,王元青,李茜.2006.湖南衡东岭茶地区古近纪地层划分与中国早始新世哺乳动物群[J].地质论评,52(2):153-162+290.

王九一,刘成林,王春连,余小灿,颜开,高超.2021.晚白垩世—古近纪华南蒸发岩矿床形成的构造和气候耦合控制[J].地质学报,95(7):2041-2051.

肖本夫,肖和平,祁玉萍,敬少群,李凤.2019.基于DEM的少震、弱震区构造地貌特征及演化分析——以湖南省茶

- 陵—永兴盆地为例[J]. 华南地震, 39(2): 147-155.
- 徐先兵. 2022. 南岭地区白垩纪至古近纪陆相盆地及其对气候变化与构造域转换的制约[J]. 华南地质, 38(4): 569-582.
- 徐亚东, 梁银平, 江尚松, 骆满生, 季军良, 张宗言, 韦一, 宋博文. 2014. 中国东部新生代沉积盆地演化[J]. 地球科学, 39(8): 1079-1098.
- 张清如. 2009. 中南地区白垩纪—新近纪孢粉化石组合序列的初步总结[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张显球, 李茜. 2010. 湖南衡阳盆地岭茶地区古近纪介形类动物群[J]. 古生物学报, 49(4): 487-501.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257-279.
- 赵小明, 牛志军, 张开明, 吴年文, 彭练红, 龙文国, 魏运许, 安志辉, 胡昆. 2017. 中南地区地层综合区划[J]. 地层学杂志, 41(3): 235-255.
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (S2): 7-14.
- 中南矿冶学院地质系红层科研小组. 1975. 湖南茶陵—永兴白垩纪—第三纪红色盆地岩相柱状剖面图说明书[R].
- 朱宁, 徐亚东, 武瑞, 韩凤禄, 黄乐清, 童潜明. 2020. 湖南株洲天元区晚白垩世恐龙化石层时代及沉积环境[J]. 地球科学, 45(3): 752-763.
- Cao K. 2018. Cretaceous terrestrial deposits in China[J]. China Geology, 1(3): 402-414.
- Cao X Z, Flament N, Li S Z, Müller R D. 2021. Spatio-temporal evolution and dynamic origin of Jurassic-Cretaceous magmatism in the South China Block[J]. Earth-Science Reviews, 217: 103605.
- Chen J Y, Yang J H, Zhang J H, Sun J F, Wilde S A. 2013. Petrogenesis of the Cretaceous Zhangzhou batholith in southeastern China: Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf-O isotopic evidence[J]. Lithos, 162-163: 140-156.
- Chung S L, Cheng H, Jahn B, O'Reilly S Y, Zhu B Q. 1997. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening[J]. Lithos, 40(2-4): 203-220.
- Coward M P, Butler R W H, Khan M A, Knipe R J. 1987. The tectonic history of Kohistan and its implications for Himalayan structure[J]. Journal of the Geological Society, 144(3): 377-391.
- Dai J, Sun B N. 2018. Early Cretaceous atmospheric CO₂ estimates based on stomatal index of *Pseudofrenelopsis papillosa* (Cheirolepidiaceae) from southeast China[J]. Cretaceous Research, 85: 232-242.
- Du B X, Sun B N, Zhang M Z, Yang G L, Xing L T, Tang F J, Bai Y X. 2016. Atmospheric palaeo-CO₂ estimates based on the carbon isotope and stomatal data of Cheirolepidiaceae from the Lower Cretaceous of the Jiuquan Basin, Gansu Province[J]. Cretaceous Research, 62: 142-153.
- Fang X M, Song C H, Yan M D, Zan J B, Liu C L, Sha J G, Zhang W L, Zeng Y Y, Wu S, Zhang D W. 2016. Mesozoic litho- and magneto-stratigraphic evidence from the central Tibetan Plateau for megamonsoon evolution and potential evaporites[J]. Gondwana Research, 37: 110-129.
- Gan C S, Wang Y J, Zhang Y Z, Zhang J. 2017. The earliest Jurassic A-type granite in the Nanling Range of southeastern South China: petrogenesis and geological implications[J]. International Geology Review, 59(3): 274-292.
- Gorczyk W, Willner A P, Gerya T V, Connolly J A D, Burg J P. 2007. Physical controls of magmatic productivity at Pacific-type convergent margins: Numerical modelling[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 163(1-4): 209-232.
- Guo F, Fan W M, Li C W, Zhao L, Li H X, Yang J H. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. Lithos, 150: 62-84.
- Haggart J W, Matsukawa M, Ito M. 2006. Paleogeographic and paleoclimatic setting of Lower Cretaceous basins of East Asia and western North America, with reference to the nonmarine strata[J]. Cretaceous Research, 27(2): 149-167.
- Hasegawa H, Tada R, Jiang X, Suganuma Y, Imsamut S, Charusiri P, Ichinnorov N, Khand Y. 2011. Drastic shrinking of the Hadley circulation during the mid-Cretaceous supergreenhouse[J]. Climate of the Past Discussions, 7(1): 119-151.
- Hui G G, Li S Z, Li X Y, Guo L L, Suo Y H, Somerville I D, Zhao S J, Hu M Y, Lan H Y, Zhang J. 2016. Temporal and spatial distribution of Cenozoic igneous rocks in the South China Sea and its adjacent regions: implications for tectono-magmatic evolution[J]. Geological Journal, 51: 429-447.

- Li B, Jiang S Y, Zhang Q, Zhao H X, Zhao K D. 2015. Cretaceous crust-mantle interaction and tectonic evolution of Cathaysia Block in South China: Evidence from pulsed mafic rocks and related magmatism[J]. *Tectonophysics*, 661: 136-155.
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 134: 98-136.
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Li H L. 2012. Late Mesozoic-Early Cenozoic deformation history of the Yuanma Basin, central South China[J]. *Tectonophysics*, 570-571: 163-183.
- Li X H, Li Z X, Li W X, Liu Y, Yuan C, Wei G J, Qi C S. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab?[J]. *Lithos*, 96(1-2): 186-204.
- Li X Y, Zhang R, Zhang Z S, Yan Q. 2018. Do climate simulations support the existence of East Asian monsoon climate in the Late Eocene?[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 509: 47-57.
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y, Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China[J]. *Economic Geology*, 104(2): 303-321.
- Liu L, Xu X S, Xia Y. 2014. Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: Evidence from episodic volcanism and related intrusions[J]. *Tectonophysics*, 614: 170-184.
- Liu Q, Yu J H, Wang Q, Su B, Zhou M F, Xu H, Cui X. 2012. Ages and geochemistry of granites in the Pingtan-Dongshan Metamorphic Belt, Coastal South China: New constraints on Late Mesozoic magmatic evolution[J]. *Lithos*, 150: 268-286.
- Meng L F, Li Z X, Chen H L, Li X H, Wang X C. 2012. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the flat-slab subduction model[J]. *Lithos*, 132-133: 127-140.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357-396.
- Peacock S M, Wang K L. 1999. Seismic Consequences of Warm Versus Cool Subduction Metamorphism: Examples from Southwest and Northeast Japan[J]. *Science*, 286(5441): 937-939.
- Qin Y, Cai Y F, Fu W, Han Z X, Liu P F, Lao C L, Zhao Y S, Han Z C, Zhou Y. 2022. Mineralogical, Geochronological, and Geochemical Characteristics of Early Cretaceous Granite in South China: Implications for Tectonic Evolution and REE Mineralization[J]. *Minerals*, 12(10): 1308.
- Quan C, Liu Y S, Utescher T. 2011. Paleogene evolution of precipitation in northeastern China supporting the middle Eocene intensification of the East Asian monsoon[J]. *Palaios*, 26(11): 743-753.
- Quan C, Liu Z H, Utescher T, Jin J H, Shu J W, Li Y X, Liu Y S. 2014. Revisiting the Paleogene climate pattern of East Asia: a synthetic review[J]. *Earth-Science Reviews*, 139: 213-230.
- Quan C, Sun C L, Sun Y W, Sun G. 2009. High resolution estimates of paleo-CO₂ levels through the Campanian (Late Cretaceous) based on Ginkgo cuticles[J]. *Cretaceous Research*, 30(2): 424-428.
- Ren J Y, Tamak K, Li S T, Zhang J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344(3-4): 175-205.
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, Wang B, Jiang S Y, Yu J H, Zhao X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 376-391.
- Tang J, Xu W L, Wang F, Ge W C. 2018. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(5): 527-559.
- Wan C B, Wang D H, Zhu Z P, Quan C. 2011. Trend of Santonian (Late Cretaceous) atmospheric CO₂ and global mean land surface temperature: Evidence from plant fossils[J]. *Science China: Earth Sciences*, 54(9): 1338-1345.
- Wang J Y, Li X H, Li L Q, Wang Y D. 2022. Cretaceous climate variations indicated by palynoflora in South China[J]. *Palaeoworld*, 31(3): 507-520.
- Wang Y D, Huang C M, Sun B N, Quan C, Wu J Y, Lin Z C. 2014. Paleo-CO₂ variation trends and the Cretaceous greenhouse climate[J]. *Earth-Science Reviews*, 129(1): 136-147.
- Wang Y, Wang Y J, Li S B, Seagren E, Zhang Y Z, Zhang P Z, Qian X. 2020. Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: New insights

- from fission-track thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 104239.
- Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Wu F Y. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of Mesozoic felsic rocks from eastern Zhejiang, South China: Geochemical contrast between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 244-259.
- Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Yuan C, Xia X P, Li L M, Wu F Y. 2009. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuehuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125 - 100 Ma and its tectonic significance for South China[J]. *Lithos*, 112 (3-4): 289-305.
- Wu C H, Rodriguez-Lopez J P, Santosh M. 2022. Plateau archives of lithosphere dynamics, cryosphere and paleoclimate: The formation of Cretaceous desert basins in east Asia[J]. *Geoscience Frontiers*, 13(6): 101454.
- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, Yang Y H, Li X H. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China[J]. *Lithos*, 150: 6-25.
- Xie J C, Yang X Y, Sun W D, Du J G. 2012. Early Cretaceous dioritic rocks in the Tongling region, eastern China: Implications for the tectonic settings[J]. *Lithos*, 150: 49-61.
- Xie Y L, Wu F L, Fang X M, Zhang D W, Zhang W L. 2020. Early Eocene southern China dominated by desert: Evidence from a palynological record of the Hengyang Basin, Hunan Province[J]. *Global and Planetary Change*, 195: 103320.
- Xu X B, Liang C H, Xu Y D. 2021. Kinematic analysis of fault-slip data in the Nanling Tectonic Belt and Cretaceous to Paleogene tectonic evolution of the Central South China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 221: 104951.
- Yang S Y, Jiang S Y, Jiang Y H, Zhao K D, Fan H H. 2011. Geochemical, zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and petrogenesis of an Early Cretaceous volcanic-intrusive complex at Xiangshan, Southeast China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 101(1-2): 21-48.
- Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, Jiang Y H, Ling H F, Luo L. 2012. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China[J]. *Lithos*, 150: 155-170.
- Yang W, Zhang H F. 2012. Zircon geochronology and Hf isotopic composition of Mesozoic magmatic rocks from Chizhou, the Lower Yangtze Region: Constraints on their relationship with Cu-Au mineralization[J]. *Lithos*, 150: 37-48.
- Yang Y T. 2013. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific[J]. *Earth-Science Reviews*, 126: 96-115.
- Ye Q, Mei L F, Shi H S, Camanni G, Shu Y, Wu J, Yu L, Deng P, Li G. 2018. The Late Cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: An overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data[J]. *Earth-Science Reviews*, 187: 186-204.
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: a preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 488(1-4): 293-325.
- Yu X C, Liu C L, Wang C L, Li F, Wang J Y. 2020. Eolian deposits of the northern margin of the South China (Jianghan Basin): Reconstruction of the Late Cretaceous East Asian landscape in Central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104390.
- Zhang L M, Wang C S, Wignall P B, Kluge T, Wan X Q, Wang Q, Gao Y. 2018. Deccan volcanism caused coupled $p\text{CO}_2$ and terrestrial temperature rises, and pre-impact extinctions in northern China[J]. *Geology*, 46(3): 271-274.
- Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, Jiang D B. 2007. Impacts of tectonic changes on the reorganization of the Cenozoic paleoclimatic patterns in China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3-4): 622-634.
- Zhang Z S, Flatøy F, Wang H J, Bethke I, Bentsen M, Guo Z T. 2012. Early Eocene Asian climate dominated by desert and steppe with limited monsoons[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 44: 24-35.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26-33.
- Zhu C G, Meng J, Hu Y Y, Wang C S, Zhang J. 2019. East-Central Asian Climate Evolved with the Northward Migration of the High Proto-Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(14): 8397-8406.