何岸北,朱作飞,赵奇. 闽西永安盆地白垩纪古气候演化及其对华南沿海地貌变化的响应[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(12): 50-63. HE Anbei, ZHU Zuofei, ZHAO Qi. Cretaceous paleoclimate evolution of Yong'an Basin in western Fujian and its response to geomorphic changes along the coast of South China[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(12): 50-63.

闽西永安盆地白垩纪古气候演化及其对 华南沿海地貌变化的响应

何岸北^{1,2,3,4},朱作飞^{1,5},赵奇¹

(1中国科学院广州地球化学研究所,边缘海与大洋地质重点实验室,广州 510640;2中国科学院深地科学卓越创新中心,广州 510640;
 3中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049;4 云南师范大学地理学部,昆明 650500;
 5 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所,三亚 572025)

摘 要:以永安盆地白垩系坂头组、沙县组、崇安组为研究对象,采集细碎屑岩样品进行了主 微量元素及稀土元素测试,并与其沉积特征、古生物化石特征进行对比分析,探究白垩纪时期 福建西部永安盆地的古气候演化特征,结合华南东南缘古气候变化,探讨二者与华南沿海中 生代晚期地貌变化的关系。结果显示,下白垩统坂头组地层样品 CIA 值为 69.91~85.29、 Rb/Sr 值为 1.13~2.21、Mg/Ca 值 为 0.57~3.57、Sr/Cu 值为 5.44~11.66、校正后古盐度指标 100*Sr/(Ba*Al₂O₃)值为1.18~1.55,表明该区早白垩世早期气候由温暖湿润转为干旱炎热; δCe 值为 0.89~1.03、V/Cr 值为 1.03~1.57、Ni/Co 值为 2.34~10.58,表明早白垩世早期主要 为弱氧化环境,间接指示该区当时气候由温湿向干热转变。早白垩世晚期以来,沙县组和崇 安组地层样品的测试结果显示, CIA 值为 67.14~75.68、Rb/Sr 值为 0.99~9.05、Mg/Ca 值为 0.37~16.22、Sr/Cu值为1.20~15.46、以及校正的古盐度指标100*Sr/(Ba*Al₂O₃)值为 0.50~1.77,指示永安盆地早白垩世晚期以来气候由干旱炎热向温暖湿润再向干旱寒冷变化; 由 δCe(0.89~1.03)、V/Cr值(0.51~1.72)、Ni/Co值(1.45~6.45)可以看出,早白垩世晚 期以来弱氧化、弱还原环境交替出现,间接证明该区域自早白垩世晚期以来气候发生了多重 转变,从干旱炎热到温暖湿润再到干旱寒冷。综上情况可以推断,永安盆地白垩纪期间古气 候出现温暖湿润—干旱炎热—温暖湿润—干旱寒冷(伴有极端气候)多次转化。将研究区 与周缘华南地区古气候进行统计对比,发现华南内陆古气候以温暖湿润向干旱炎热转变为主, 华南沿海与内陆古气候转变的差异是对晚中生代华南沿海地貌变化的响应。

关键词: 闽西; 白垩纪; 华南沿海; 古气候; 古地貌; 地球化学 中图分类号: P595; P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.220

0 引言

古地貌变化是地球动力学和板块构造作用的

收稿日期: 2022-03-20

资助项目:国家自然科学基金委(NSFC)-广东联合基金"华南陆壳结构 与南海北部地质过程研究"(U1701641);南方海洋科学与工程广东省实 验室(广州)人才团队引进重大专项"南海北部陆缘岩石圈薄化-破裂过程 及其资源效应"(GML2019ZD0205)

第一作者:何岸北(1990—),男,博士,讲师,主要从事构造地质方面的研究工作. E-mail: 270796562@qq.com

首要表现,对区域古气候、大气循环都有重要的影响^[1]。自中生代以来,古太平洋板块的俯冲引发了 强烈的构造和岩浆活动,导致华南地区的地形地 貌发生重大变化。许多学者认为,中生代晚期中 国东南沿海形成了一条沿海山脉,不仅在当时形 成了东高西低的地貌格局,还影响了华南内陆的 气候^[23]。然而,关于古海岸山脉是否存在,学术界 历来存在许多争议。陈丕基^[2]和LI等^[4]通过野 外地质调查和区域地层对比发现,在白垩纪时期 华南地区沉积中心发生了迁移,形成了从内陆向

51

沿海迁移,并且在中国东南沿海浙闽粤山前地带 构建了巨厚的磨拉石堆积。CHEN等^[1]、YAN等^[5] 和TAN等^[6]通过对比华南内陆、山东半岛及南海 北缘盆地白垩纪到中新世的物源变化,发现中国 东部沿海存在着古海岸山脉。除了定性判断古海 岸山脉的存在,还有一些学者利用质量平衡法、低 温热年代学方法定量重建古高程,反演山脉的隆 升过程^[7-10]。前人对于华南中生代晚期地貌变化 的研究主要依托于野外地质调查及区域地层对比、 低温热年代学、沉积量与剥蚀量的计算、碎屑锆石 年代学等方法^[5,7-10]。山体的抬升、地貌的变化必 然引起周缘盆地古气候及生态环境的改变,但前 人关于古地貌与古气候间有怎样的耦合关系却缺 乏探讨研究。

气候是物源区风化程度的重要影响因素,当源 岩经历风化过程时,沉积物中的化学元素会表现 出不同程度的富集或亏缺。因此,沉积物中化学 元素含量特征既能反映源区风化程度,还能有效 指示沉积环境和古气候变化^[11]。近年来,利用沉 积物地球化学元素特征识别沉积环境和古气候的 方法日益成熟且得以广泛应用^[12-16]。闽西地区(福 建西部)作为华南板块东南部的一部分,受到了晚 中生代华南沿海地貌变化的影响。这一变化对闽 西地区的沉积环境和古气候也产生了影响,并通 过沉积物中的地球化学元素记录下来。因此,对 闽西地区沉积地球化学元素进行分析,对于揭示 华南沿海地区的古地貌格局、沉积环境、古气候及 其演化特征均具有重要意义。许中杰等[13]和陈佩 蓉等^[15] 通过对闽西南地区沉积岩的地球化学元素 分析认为,晚三叠世一中侏罗世气候以湿暖和半温 湿为主。李祥辉^[17]、刘玲^[18]和刘友祥^[19]分别通 过对古土壤、黏土矿物和孢粉组合的研究认为,闽 西白垩纪早、中期为半干旱气候。前人对闽西地 区古气候方面的研究局限性较大,主要集中在中 生代早期,利用古土壤、黏土矿物分析、古生物特 征等手段,中生代晚期缺乏沉积地球化学方面的 研究,关于地貌变化对古气候方面的影响也鲜有 涉及。因此,本文对闽西永安盆地中生界白垩系 坂头组、沙县组和崇安组进行了元素地球化学分 析,并结合同时期沉积特征、古生物化石特征以及 区域古气候资料来综合研究闽西永安盆地白垩纪 古气候变化特征,以期为华南东南缘中生代晚期 区域古气候变化特征及华南沿海地貌变化的研究 提供一些新的依据。

1 区域地质概况

华南板块是新元古代早期扬子板块与华夏板 块沿江山绍兴断裂带拼合形成的^[20-24],其北与华北 板块以秦岭-大别造山带相隔,西南以哀牢山-松马 缝合带为界与思茅地块和印支陆块接壤,东与太平 洋相邻(图1)^[25-27]。华南陆块在中生代晚期受太平 洋板块俯冲作用的影响,广泛分布半地堑/地堑红层 沉积、穹隆构造、侵入/喷出岩浆岩以及相关的多金 属成矿作用等^[10, 26, 28-37]。华南沿海中生代经历多期 的挤压和伸展构造^[38-40],地形地貌发生了巨大变化, 使得中国东南部广泛分布盆岭构造。伸展作用导 致了区域裂谷和岩浆活动,同时产生了大量的花岗 质岩浆侵入及火山喷发,形成了大规模的伸展断陷 盆地^[4, 27-29, 32, 41],而挤压作用导致沿海地区的走滑 和逆冲剪切构造发育^[42-43]。

永安盆地位于华南陆块东南缘,地处福建省西 部,沿 NE-SW 向展布,经福建西部的永安、大田、 漳平、龙岩进入广东北部的梅县、大埔,面积约 1.2 万 km²(图 2a)^[44-45]。盆地四周低山环绕,整体 形态为一山间洼地。盆内褶皱、断裂发育^[46],东侧 以贯穿盆地的政和-大埔断裂为界与第四纪沉积物 和新生代中期火山岩相隔,而西侧以邵武-河源断裂 为界与扬子板块相隔,北与武夷山相毗邻。盆地基 底由前南华系变质岩、南华系一震旦系碎屑岩、钙 硅质岩以及中酸性--酸性火山岩构成。盆地的主 要沉积盖层由古生界上泥盆统、中生界上三叠统、 中下侏罗统以及白垩系组成; 而晚渐新世和第四纪 的沉积物只零星出露在盆地范围内^[44, 47]。侵入岩 主要形成于晚古生代和早中生代^[48]。盆地内白垩 系主要发育下白垩统坂头组、下白垩一上白垩统沙 县组和上白垩统崇安组(图 2b)^[44,49]。其中,下白垩 统坂头组主要分布在永安、连城、大田等地,沙县组 和崇安组主要分布在永安、漳平、梅县等地。坂头 组剖面位于永安吉山村,是一套含火山质陆相碎屑 岩,主要为灰色凝灰质砂岩、粉砂岩、黑色页岩、泥 岩。坂头组下部假整合于下渡组火山岩之上,坂头 组底部以细碎屑岩或者泥岩为主,夹凝灰质砂岩, 中部多以黑色页岩、泥岩为主,化石含量丰富;在剖 面的中下部,主要观察到沉积构造如水平层理、小 型交错层理和重荷模等,反映当时水动力条件较弱 (图 3a、b),为湖泊沉积环境。坂头组顶部以粗碎屑 岩为主,主要为粗砂岩和细砾岩;剖面上部可见平



图内显示了中国东南部主要造山带、陆块、太古宙和元古宙结晶基底单元、白垩纪岩浆岩组合和侏罗纪岩浆岩的分布⁽⁴⁸⁾

图 1 华南地质简图



行层理和中型交错层理,反映水动力条件变强,总体以河流相沉积环境为主。镜下鉴定结果表明,样品中的石英含量较多,矿物成分和结构的成熟度均较高。同时,样品的磨圆度中等至良好,矿物为次圆-次棱角状,分选程度为中等(图 3g)。这些特征表明,样品可能经历了较长距离的搬运沉积过程。沙县组、崇安组剖面位于龙岩上家邦村。其中,沙县组岩性主要为紫红色粉砂岩、细砂岩、砂砾岩(图 3 c),下部以紫色细碎屑岩为主,常见粉砂岩;上部以紫红色、褐色中粗碎屑岩为主,常见细砾岩、中粗砂岩、含砾砂岩。而崇安组岩性主要为紫红色中粗砾岩、粗砂岩、砂砾岩(图 3c)。在剖面中观察到了平行层理、中大型交错

层理和冲刷构造等,这些沉积构造表明这一时期水动力条件较强(图 3c—f),总体为河-湖相和河流-冲积扇相沉积(图 2b)。镜下的观察结果发现,样品中矿物的磨圆度较差,矿物成分和结构成熟度均较低,矿物呈棱角-次棱角状,且分选性较差,主要可见花岗岩岩屑、火山岩屑(图 3h、i)。

2 样品采集与实验方法

样品采自永安吉山村和龙岩上家邦村,沿公路 分间隔采样(图 2)。为避免采取样品受风化和蚀变 作用的影响,选择从剖面中的新鲜面采取样品。对 中侏罗统至上白垩统的 14 个细粒碎屑岩样品进行 第40卷第12期



图 2 永安盆地地质概况

Fig.2 Regional geological outline of the Yong'an Basin



 (a)灰绿色页岩中的水平层理(坂头组,永安吉山地区);(b)灰绿色砂岩中见重荷模结构(坂头组,永安吉山地区);(c)正粒序层理,砾岩与砂岩组成多个沉积旋回(沙县组,漳平上家邦地区);(d)斜层理,下部为杂乱砾岩堆积(沙县组,漳平上家邦地区);(e)砾岩中可见透镜状砂岩(崇安组, 漳平上家邦地区);(f)混乱堆积的砾岩,最大直径约为10 cm (崇安组,漳平上家邦地区);(g)长石石英砂岩(坂头组,永安吉山地区);
 (h)岩屑长石砂岩(沙县组,漳平上家邦地区);(i)岩屑长石砂岩(崇安组,漳平上家邦地区)

图 3 永安盆地岩样野外及镜下特征

Fig.3 Field and microscope photos of rock samples from the Yong'an Basin

了主、微量元素分析。实验测试在中国科学院广州 地球化学研究所同位素国家重点实验室进行。

选取了新鲜、未发生蚀变的样品,并将其研磨 至≤200 目。随后,使用 1M 乙酸进行清洗,以去除 可能存在的生物/自生碳酸盐^[50]。通过 Rigaku RIX 2000 波长色散 X 射线荧光光谱仪测定了熔融玻璃 珠主要元素氧化物的含量。分析准确度通常优于 5%。微量元素通过 PerkinElmer Sciex ELAN 6000 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行分析。每 个样品选取约(40±5) g,并将粉末样品溶解于高压 聚四氟乙烯压力溶弹中含有 HF 和 HNO₃ 混合物的 溶液中,在 190 ℃ 下持续烘干 48 h。使用内标溶液 中的 Rh 元素来监测计数过程中的信号漂移。采用 美国地质勘探局和中国岩石标准(BHVO-1、W-2、 AGV-1、G-2、GSR-1 及 GSR-3)进行浓度校准。分 析准确度通常优于 5 %。

3 沉积物地球化学对古气候的响应

沉积物元素的积累和迁移既与其本身的物理 和化学性质密切相关,同时也指示了古气候环境的 变化,因此,分析沉积物中主、微量元素的含量及其 比值,可以更好地了解当时的气候、环境特征和其 演变情况^[12,51]。

3.1 化学风化作用对古气候的指示

化学蚀变指数(CIA)是 NESBITT 和 YOUNG^[52] 提出的一种定量指标,可用于研究沉积物源区岩石 的化学风化和蚀变程度。CIA 值的变化可反映岩 石形成过程中气候条件的差异^[52]。CIA 值通常为 50~100,代表岩石的不同风化程度,包括未风化到 完全风化。在炎热和干旱气候条件下形成的沉积物 CIA 值最高,约为 80~100;在温暖和潮湿的气候中形成的沉积物 CIA 值中等,为 70~80,在干燥和寒冷的气候中形成的沉积物 CIA 值最低,约为60~70^[11]。

早白垩世早期坂头组 CIA 值变化较大,介于 69.91~85.29(平均为 76.71,表 1),暗示坂头组早期 气候以温暖湿润为主,后期转为干热(图 4a)。在早 白垩世晚期一晚白垩世早期,沙县组的 CIA 值变化 范围大,为 67.14~75.68(平均为 71.30)。下部的 CIA 值比上部高,表明早期的温度较高,主要是温 湿干热的气候,后期温度可能下降,气候变得干旱寒冷 (图 4a)。在晚白垩世早期,崇安组的 CIA 值变化不 大,为 66.77~70.17(平均为 67.98),表现出与沙县 组下部的 CIA 值一致的减小趋势,反映主要为干旱 寒冷气候^[53](图 4a)。

Rb和Sr存在于稳定性不一致的矿物中。矿物 在遭受化学风化的时候,Sr比Rb更容易发生迁移。 因此,Rb/Sr值较高代表了气候温暖湿润,岩石风化 作用强烈。相反,低Rb/Sr值较低则意味着气候炎 热/寒冷干燥,岩石风化作用较弱^[54-56]。早白垩世早 期坂头组的Rb/Sr值较低,介于1.13~2.21(图4b)。 沙县组的Rb/Sr值从早白垩世晚期到晚白垩世早期 变化范围很大,介于0.99~9.05(图4b)。沙县组下部 Rb/Sr值逐渐降低并短暂性升高,而上部的Rb/Sr 值逐渐增加,指示早白垩世晚期的气候以炎热干燥 为主,短暂温暖湿润,有利于化学风化,后期逐渐变 为温暖湿润/干燥寒冷。晚白垩世早期崇安组的 Rb/Sr值较低,变化较小,介于1.81~2.87(图4b), 反映出白垩纪晚期化学风化强度较弱,结合CIA值 认为,当时整体气候可能是干燥寒冷的^[53]。

表 1 永安盆地白垩系细碎屑岩元素比值^[53]

Table 1 Element ratio of fine clastic rocks of Cretaceous in Yong an Basin														
样品号	JS-4-2	JS-6	JS-10	SSX-4	SSX-7	SSX11	SSX-14	SSX-20	SSX-24	SCA-2	SCA-4	SCA-5	SCA-7	SCA-9
CIA	74.94	69.91	85.29	75.54	75.68	74.27	67.73	67.43	67.14	68.58	70.17	66.77	67.11	67.29
Rb/Sr	2.21	1.13	2.01	9.05	2.85	0.99	1.82	1.79	2.09	2.07	2.87	2.69	1.81	2.71
Mg/Ca	0.57	1.09	3.57	16.22	11.08	7.19	1.35	0.38	0.37	1.78	1.49	0.64	0.53	0.77
Sr/Cu	5.44	11.66	5.46	1.20	4.10	15.46	7.25	6.24	6.59	6.81	5.29	5.53	6.37	5.52
Sr/Ba	0.21	0.22	0.22	0.06	0.14	0.21	0.16	0.17	0.14	0.23	0.16	0.14	0.18	0.15
$100 \times Sr/(Ba \times Al_2O_3)$	1.25	1.55	1.18	0.50	1.01	1.40	1.36	1.49	1.13	1.77	1.27	1.07	1.52	1.16
V/Cr	1.57	1.03	1.51	1.72	1.17	1.37	0.60	0.61	0.91	1.00	0.61	0.77	0.51	0.72
Ni/Co	3.83	2.34	10.58	1.45	3.13	2.44	3.83	4.81	4.05	2.91	4.88	4.32	6.05	4.49
δCe	1.03	1.00	0.89	1.35	0.93	0.85	0.94	1.01	0.96	0.88	1.14	1.12	0.93	1.04



图 4 永安盆地白垩系样品元素地球化学指标在垂向上的变化

Fig.4 Vertical variation of elemental geochemical parameters in Cretaceous samples from the Yong'an Basin

3.2 Mg/Ca 和 Sr/Cu 对古气候的指示

Mg/Ca 值可反映古海水温度变化,并能间接指 示古气候条件^[13]。高 Mg/Ca 值表示气候干燥炎热, 而低 Mg/Ca 值代表气候温暖潮湿。在图 4c 中,可 以看到 Mg/Ca 值和 CIA 值呈现相似的变化趋势^[53]。 白垩纪初期坂头组的 Mg/Ca 值为 0.57~3.57(图 4c), 总体呈上升之势,指示温度升高,气候已从温暖/寒 冷转为炎热。白垩纪中期沙县组的 Mg/Ca 值介于 0.37~16.22(图 4c),表明古温度出现先升高后降低 的变化,气候由炎热向温暖/寒冷的转变。晚白垩世 早期崇安组的 Mg/Ca 值相对较低,为 0.53~1.78, 反映了当时存在温暖/寒冷的气候条件。此外,喜干 元素 Sr 和喜湿元素 Cu 的比值也记录了古气候的 演变。当 Sr/Cu 值介于 1.5~10, 表明气候温暖潮湿, 当比值>10,表示气候干燥炎热^[57]。在白垩纪样品 中, 坂头组 JS-6 和沙县组的 Sr/Cu 值分别为 11.66 和 15.46,其他样品均<10。从坂头组到崇安组, Sr/Cu 值显示出略微增加的趋势(图 4d)。这反映出 尽管气温较低,但气候整体趋于干旱。此外,在坂 头组顶部和沙县组下部时期也曾出现短暂的温度 上升。

3.3 古盐度对古气候的指示

由于 SrSO₄ 的溶解度高于 BaSO₄ 的溶解度,因 此 Sr/Ba 值可作为反馈湖水盐度的重要指标。当温 暖潮湿的气候出现时, Ba²⁺会早于 Sr²+沉淀, Sr/Ba 值就变小。当温度升高,导致天气炎热和干旱时,湖 水蒸发增加,溶解度下降,导致 Sr/Ba 值就会变大^[58]。 在沉积过程中,沉淀的锶盐、钡盐以及来自陆地的 碎屑中的硅酸盐矿物和碳酸盐矿物中赋存的 Sr 和 Ba 均是沉积物中 Sr 和 Ba 的来源。因此,一些学者 使用代表陆源碎屑的 Al₂O₃ 来校正 Sr/Ba 值^[15, 58]。 前人研究认为, Sr/Ba 值 <0.5 代表淡水环境, 介于 0.5~1.0 代表半咸水环境, >1.0 代表咸水环境^[59-60]。 从坂头组到崇安组样品的 Sr/Ba 值都<0.5,表明当 时处于低盐度的淡水沉积环境(图 4e)。从图 4f 可 以看出, 经 Al₂O₃ 校正后的 Sr/Ba 值与 Sr/Ba 值呈 现相同的变化趋势,表明沉积在陆源碎屑中的硅酸 盐和碳酸盐岩矿物中的 Sr 和 Ba 对 Sr/Ba 值影响甚 微,可以忽略。坂头组样品的校正 Sr/Ba 值影响甚 微,可以忽略。坂头组样品的校正 Sr/Ba 值影响甚 意,可以忽略。坂头组样品的校正 Sr/Ba 值影响甚 意,可以忽略。坂头组样品的校正 Sr/Ba 值影响甚 意,可以忽略。坂头组样品的校正 Sr/Ba 值影响甚 乱3,范围为 1.18~1.55(图 4f)。沙县组样品的校 正 Sr/Ba 值平均为 1.36,范围为 1.07~1.77(图 4f)。总体而言,崇安组的校正 Sr/Ba 值高于坂头组,且与沙县组相同(图 4f)。

从坂头组沉积晚期至沙县组上段(JS-10至 SSX-11), Sr/Ba值普遍较高且有短暂降低,指示水 体的盐度在白垩纪中期存在波动,水体的盐度普遍 较高,但也出现了短暂的下降。这一现象的出现可 能是因为降水增加稀释盐度,指示当时的气候处于 炎热干旱的状态,但也会出现暂时性温暖潮湿的气 候条件。早白垩世早期和晚白垩世早期出现了 2 次盐度增加的情况,这可能与降雨量减少、气候干 旱炎热有关,指示气候向干旱化发展的趋势。剖面 样品的 Sr/Ba值大致与 Rb/Sr 值变化趋势一致,呈 正相关,表明二者反映的气候条件类似。

3.4 氧化还原判别指标对古气候的指示

生物活动对气候变化异常敏感,变化的生物活动又会影响水的含氧量。生物繁殖适宜在温暖湿 润的气候条件下进行,从而促使生物光合作用加强, 以进一步增强其对大气中 CO₂ 的吸收。进而导致 大气中氧气的分压加大,从而使得水中的氧气很难 逃逸到大气中来。另外,生物骨骼的构建也会消耗 掉水中的 Ca 和 CO₂,从而使水中富含氧气。干热/ 冷的气候会导致生物活性降低,导致 CO₂ 消耗速度 相应降低。空气中 CO₂ 的相对增加会导致水体中 CO₂ 的逃逸度降低,氧气的逃逸度升高,水体出现 相对还原状态^[13]。因此,氧化还原指数可以间接指 示古气候特征。Ce 异常(δCe)可用作判断氧化还原 条件的有效指数。δCe 值越大,代表氧化程度降低, 而 δCe>0.95 表示负异常,表明存在还原环境^[61]。另 外,还可以利用 V/Cr、Ni/Co 值来对比判断氧化还 原环境^[62-66]。

研究区白垩系样品的 δCe 值介于 0.85~1.35, 坂头组的 δCe 值为 0.89~1.03(图 4g),指示坂头组 以氧化环境为主,气候温暖湿润。沙县组的 δCe 值 为 0.85~1.35,平均为 1.00(图 4g)。崇安组的 δCe 值为 0.88~1.14,平均为 1.02(图 4g)。从沙县组样 品到崇安组样品的 δCe 值逐渐由负异常变为正异 常,表明水中含氧量逐渐减少,环境从弱氧化向弱 还原的转变,也间接表明气候从温暖湿润向干旱 炎热/寒冷转变。同时,由于季节性降水以及干旱的 环境,使周围水体处于弱氧化和弱还原的交替环 境中。

白垩系样品的 V/Cr 值均<2,表明为氧化环境 (图 4h)。坂头组样品 JS-10 和崇安组 SCA-7 的 Ni/Co 值分别达到 10.58 和 6.05,其他样品 Ni/Co 值 均<5,表明这些水体主要处于氧化环境状态下。 然而,在早白垩世中期和晚白垩世早期,水体的氧 含量出现下降,指示暂时性的还原环境。通过 Ni/Co 值显示总体增加趋势(图 4i)可以看出,早白垩世中 期和晚白垩世气候逐渐向干旱方向转变。根据不 同氧化还原标准的比较,可以确定白垩纪时期研究 区主要处于氧化性环境,随后逐渐转向还原性环境。 这表明白垩纪时期的生物活动非常活跃,存在温暖 湿润—干旱炎热/寒冷的周期性变化。而到了白垩 纪后期,生物活性逐渐减弱。

4 讨论

4.1 沉积特征与古气候的关系

地层的岩性和岩相在一定程度上受古气候的

影响,因此地层的沉积特征对于判断古气候具有一定的参考价值^[15-16,67-68]。沉积岩不同的颜色可以反映出不同的形成环境。灰色、黑色可能与有机质硫化铁等成分有关,反映气候条件有利于有机质保存,指示温暖湿润的气候。紫色、红色、棕色表明沉积物中富集如赤铁矿等的三价铁,指示高度氧化的干旱或半干旱环境^[69]。

闽西南永安盆地早白垩世早期沉积的坂头组 主要为灰色凝灰质砂岩、粉砂岩和黑色页岩,化石 丰富,为湖泊相沉积环境,说明当时气候温暖潮湿, 适宜生物的大量繁殖。坂头组顶部粒度变大,以黄 棕色砂岩、含砾砂岩为主,转化为河流相沉积环境, 颜色向上加深。早白垩世晚期沙县组下部以紫红 色粉砂岩、泥岩为主,夹黄绿色砂砾岩、细砂岩,暗 示气候由坂头组顶部开始由温暖潮湿向干旱炎热 转换。沙县组上部以紫红色细砂岩、砂砾岩为主, 夹细砾岩。晚白垩世早期崇安组以紫红色厚层状 砂砾岩、砾岩、粗砂岩夹薄层砂岩、粉砂岩为主,指 示干旱-半干旱的环境。垩世系坂头组至崇安组由 灰色转变为紫红色,岩石红色调自下而上所占的比 例增加,沉积物粒度逐渐增大,组成由细到粗的沉 积序列,表明沉积环境从湖泊到河流再到冲积扇的 变化,且早白垩世晚期以来气候逐渐变得干燥,氧 化作用减弱。白垩纪沉积特征指示的古气候演化 与元素地球化学数据反映的结果一致,表明古气候 经历了从温暖湿润到干燥炎热/寒冷的转变。

4.2 古生物特征与古气候的关系

生物与其所处的生态环境和气候密切相关,因 此生物化石可以有效地记录古气候的演变。目前, 地质学家常通过生物化石来推断地层年代和古气 候^[70-71]。

坂头组剖面古生物化石丰富,下段鱼类化石丰 富,见 Mesoclupea cf.,证明当时为淡水近岸环境,气 候温暖湿润^[72]。来自浙江相应地层的数据说明,在 坂头组沉积时期,恐龙的活动范围广泛而频繁,表 明华南当时的气候条件良好,温暖湿润的气候适合 各种动物的生存。此外,剖面的上部富含植物和叶 肢介化石,其中包括真蕨纲海金砂科的 Ruffordia 和 中国蕨科的 Onychiopsis,这些化石进一步证实了当 时温暖湿润的气候条件^[71-72]。坂头组剖面自下而 上植物化石逐渐丰富,表明随气候逐渐干热,水体 逐渐变浅。顶部富含有 Darwinula(达尔文介)-Damonella(达蒙介)组合介形虫,这些化石反映偏干旱 炎热的气候。坂头组时期,水体逐渐萎缩,气候由 温暖湿润向干旱炎热转变^[71-72]。

沙县组剖面化石种类多样,下部层位含有少量 鱼类、介形虫和植物化石,且在剖面中发现了喜欢 温暖潮湿环境的植物化石 *Cladophlebis* sp.,指示这 一时期气候温暖湿润,适宜生物生存。剖面上部植 物化石种类丰富,其中包括 *M.parceramasa*, *Sphenopteris* sp., *Classopollis*(克拉梭粉),表明当时的环 境是干热半湿润的。然而,在崇安组中,化石种类 相对较少,且前述丰富的生物化石基本上消失了, 只有局部发现了孢粉,说明当时气候可能变得干旱 炎热、严寒或者是极端的。*Classopollis*(克拉梭粉) 的减少和 *Pinuspollenites*(松粉)的增加意味着局部 存在着温暖潮湿的气候,这可能与季节性降水等极 端天气有关^[73-74]。

坂头组、沙县组和崇安组产出的生物化石表明, 闽西南永安盆地在白垩纪时期经历了多种古气候 转换(暖湿—干热—暖湿—干热/干冷(极端天气), 这与沉积物地球化学和沉积特征分析结果相符。

4.3 古气候演化对地貌变化的响应

受太平洋板块俯冲影响,华南地区自中生代晚 期以来经历了盆地类型的转换、强烈的岩浆活动、 盆岭构造的形成以及古地貌格局的变动。古气候 的变化受地球动力学的影响,是古地貌变化等地质 过程的结果。为了研究华南沿海地区古地貌与古 气候之间的关系,在分析永安盆地古气候演变的基 础上,还比较了福建、广东、浙江、江西和湖南等省 自白垩纪以来的古气候变化。研究结果显示,自白 垩纪以来,华南东南缘的古气候呈现出由温暖湿润 向干旱炎热转变的趋势(表 2)。局部季节性降雨等 极端天气可能造成洪水、泥石流或沙漠气候,并导 致动植物生存数量的变化,从而产生不同数量的动 植物化石,这些化石也指示了气候的变化。华南东 南缘地区古气候的类似变化可能是对区域古地貌 格局剧烈变化的响应。

根据对古太平洋板块俯冲与华南沿海地貌变 化之间关系的综合分析认为,早白垩世早期,在太 平洋板块俯冲后撤作用的影响下,形成了以伸展应 力为主的坂头组断陷(湖)盆地,这一时期地层沉降 幅度较小,碎屑堆积速率较低。坂头组早期(JS-4-2 和 JS-6)的 CIA 和 Mg/Ca 值较低,显示出温暖湿润 气候下的中等风化程度。岩性主要为灰绿色凝灰 质砂岩和灰黑色页岩^[37,72], δCe 值约为 1, V/Cr 值 <2,表明为氧化环境(图 4h)。Ni/Co 值约为 3,指 示弱氧化环境。在板块俯冲的影响下,华南沿海地 区开始逐渐抬升,但这一时期抬升的速率还较低, 浙东北地区仍受到海侵作用的影响^[75]。因此,此时 华南沿海地貌的变化对来自太平洋的暖湿空气并 没有起到强烈的阻挡作用,华南地区仍以温暖湿润 的气候为主。

早白垩世晚期,受太平洋板块向华南板块俯冲 产生的瞬时挤缩作用影响,在120~110 Ma产生华 南沿海地区快速抬升,东南沿海海侵消退^[37,75]。海 陆变化将影响自然界的水循环,而快速抬升的地貌 则会阻碍太平洋西来的暖湿空气进入,从而对大气 环流产生影响,并进一步直接影响华南东南缘的区 域气候^[2,76],这导致华南沿海及内陆的福建、广东、 江西等地区的古气候由温暖潮湿向干旱炎热快速 转变。坂头组剖面顶部粗砂岩和细砾岩的出现反 映粒度明显增大,表明沉积环境发生变化,发育河 流沉积。同时,在沙县组剖面底部,岩性颗粒逐渐 增大,发生湖泊相向河流相的沉积环境变化。在坂 头组剖面顶部至沙县组剖面底部沉积环境的变化 (JS-10 至 SSX-11)、CIA 和 Mg/Ca 值的增加表明温 度的升高。同时, Sr/Cu 和 Sr/Ba 值的增加也佐证了

Table 2	Cretaceous pa	leoclimate o	characteristics of	f the `	Yong'an	basin and	d its su	rrounding	areas
---------	---------------	--------------	--------------------	---------	---------	-----------	----------	-----------	-------

地质年代	地区气候条件											
	华南东南缘											
		华南内陆	Ì									
	湖南	湖北	江西	浙江西部	福建西部	广东北部	广东南部					
晚白垩世早期	较炎热干旱-半 干旱 ^[77-78]	干旱半干旱[79]	半湿润-半干旱-湿润 (伴有极端气候) ^[80]	温湿、干冷 ^[17-18]	干冷(伴有 极端气候)	干冷气候[81,82]	干旱半干旱 ^[83]					
早白垩世晚期—晚 白垩世初期		干旱 ^[84]	干旱[85]	半干旱炎热 ^[17-18]	干热,后期出现 短暂温湿		干旱 ^[83]					
早白垩世早期		干旱 ^[84]		潮湿-半潮湿, 出现变干 ^[19, 86]	温湿转为干热		干旱 ^[83]					

白垩纪全球变暖的趋势以及在华南沿海隆起背景 下华南沿海地区气候向干旱炎热变化的观点。然 而,随着气候转化过程中海拔的快速上升,华南沿 海山区内部温度和湿度均随之出现了下降,呈现出 短暂的温暖湿润的气候假象,导致 CIA 和 Mg/Ca 值出现下降。由 Sr/Cu 和 Sr/Ba 值可知,此时的气 候以温暖湿润为主的弱氧化环境,指示有暂时性的 温暖湿润气候出现。

晚白垩世早期,太平洋板块俯冲后退,华南地 区在伸展作用主导的背景下形成了许多 NE 向伸展 盆地。由于华南沿海山脉与相邻山间盆地间的高 差很大,阻挡了来自太平洋的温暖潮湿的气流,导 致华南东南缘形成了区域性的干旱炎热气候,在全 球温度升高的背景下甚至出现了沙漠沉积。在这 样高差较大的背景下,极端天气如季节性降水形成 冲刷山体的泥石流,造成频繁发生地质灾害,导致 恐龙等大型物种灭绝或生物多样性减少,从而使得 气候暂时性湿润。同时,由于山脉海拔可能高达 3500~4000 m^[2,9],山间盆地内的温度会随海拔增 加而降低,因此 CIA 和 Mg/Ca 值也会降低,表现出 局部干燥寒冷的气候。研究表明,通过对粤北丹霞 盆地成壤碳酸盐的古温度计算以及福建崇安剖面 的古生物学研究证实了山脉内部盆地干燥寒冷的 气候特征^[81]。高的 Sr/Cu、Sr/Ba 值, 以及氧化还原 指标均升高,海岸山脉内部的某些地区气候可能 干旱寒冷,而华南内陆地区气候则普遍干旱炎热 (表 2)。这一系列气候变化与全球变暖释放了大量 的二氧化碳温室气体,导致全球温度升高,含氧量 降低,生物活动减少,因此,后生生物为了适应这种 极端环境气候个体趋向于小型化。

本文通过研究闽西地区永安盆地白垩系坂头 组、沙县组、崇安组细碎屑岩样品的化学风化作用、 Mg/Ca和Sr/Cu值、古盐度、氧化还原判别指标,结 合研究区的沉积和古生物学特征,认为闽西永安盆 地古气候经历了温湿(早白垩世早期)—干热(早白 垩世中期)—干热/冷(早白垩世晚期—晚白垩世)的 变化,期间短暂出现温湿(早白垩世晚期)。华南沿 海海岸山脉的形成使得华南东南缘周围邻区古气 候演化趋势既具有相似性,又存在差异性,总体表 现为由温暖湿润向干旱炎热转化的趋势,然而海岸 山脉局部出现了干燥寒冷的气候,这种古气候演变 趋势是对华南中生代晚期沿海地区经历的地貌抬 升、海岸山脉形成的响应。

5 结论

闽西永安盆地细碎屑岩样品的沉积物元素地 球化学特征、沉积特征和古生物化石组合揭示下白 垩统坂头组经历了从温暖湿润到干热的气候变化。 坂头组早期气候以温暖湿润为主,后期开始向干热 气候转变。下白垩统上部一上白垩统沙县组早期 以温湿气候为主,晚期气候开始向干冷气候(极端 季候)转变,这一转变一直延续到上白垩统崇安组 时期。华南沿海古海岸山脉的形成阻挡了暖湿气 流向华南内陆的运移,使得华南内陆在晚白垩世气 候干旱炎热,与闽西永安盆地存在差异。永安盆地 古气候演化以及与区域转变的差异,不仅体现了地 貌变化对气候的影响,也是对华南晚中生代地貌变 化转换的响应。

参考文献:

- [1] CHEN Y, MENG J, LIU H, et al. Detrital zircons record the evolution of the Cathaysian Coastal Mountains along the South China margin[J]. Basin Research, 2022, 34(2): 688-701.
- [2] 陈丕基.晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐 湖化 [J]. 地层学杂志, 1997, 21(3): 44-54. CHEN P J. Coastal Mountains of SE China, desertization and saliniferous lakes of Central China during the Upper Cretaceous[J]. Journal of Stratigraphy, 1997, 21(3): 44-54.
- [3] CHEN P J. Paleoenvironmental changes during the Cretaceous in eastern China [M]//OKADA H, MATEER N J. Cretaceous Environments of Asia. Elsevier, 2000: 81-90.
- [4] LI J H, ZHANG Y Q, DONG S W, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 134: 98-136.
- [5] YAN Y, HU X Q, LIN G, et al. Sedimentary provenance of the Hengyang and Mayang basins, SE China, and implications for the Mesozoic topographic change in South China Craton: evidence from detrital zircon geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(6): 494-503.
- [6] TAN J, ZHANG L, WANG C, et al. Late Cretaceous provenance change in the Jiaolai Basin, East China: implications for paleogeographic evolution of East Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 194; 104188.
- [7] 陈云华.中国东南地区晚白垩世沉积响应与古气候 [D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
 CHEN Y H. Late Cretaceous sedimentary responses to the "Coast Range" and paleoclimatechanges in Southeast China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technolog, 2008.
- [8] LI X M, ZOU H P. Late Cretaceous-Cenozoic exhumation of the southeastern margin of Coastal Mountains, SE China, revealed by fission-track thermochronology: implications for the

第40卷第12期

topographic evolution[J]. Solid Earth Sciences, 2017, 2(3): 79-88.

- [9] DING R X, MIN K, ZOU H P. Inversion of topographic evolution using low-T thermal history: a case study from coastal mountain system in southeastern China[J]. Gondwana Research, 2019, 67: 21-32.
- [10] WANG Y, WANG Y J, LI S B, et al. Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: new insights from fission-track thermochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 191: 104239.
- [11] 冯连君, 储雪蕾, 张同钢, 等. 莲沱砂岩: 南华大冰期前气候转 冷的沉积记录 [J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2387-2393.
 FENG L J, CHU X L, ZHANG T G, et al. Liantuo sandstones: sedimentary records under cold climate before the Nanhua big glaciations[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2387-2393.
- [12] 王随继,黄杏珍,妥进才,等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演 化特征及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 66-71.
 WANG S J, HUANG X Z, TUO J C, et al. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 66-71.
- [13] 许中杰,程日辉,沈艳杰,等.闽西南地区晚三叠—早侏罗世 温湿-干热气候转变的沉积记录[J].中国矿业大学学报,2012, 41(5):783-792.

XU Z J, CHENG R H, SHEN Y J, et al. Sedimentary records of the climatic transition from warm and humid to dry and hot during Late Triassic-Early Jurassic in southwestern Fujian [J]. Journal of China University of Mining &Technology, 2012, 41(5): 783-792.

 [14] 徐崇凯, 刘池洋, 郭佩, 等. 潜江凹陷古近系潜江组盐间泥岩 地球化学特征及地质意义 [J]. 沉积学报, 2018, 36(3): 617-629.

> XU C K, LIU C Y, GUO P, et al. Geochemical characteristics and their geological significance of intrasalt mudstones from the Paleogene Qianjiang Formation in the Qianjiang Graben, Jianghan Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(3): 617-629.

[15] 陈佩蓉,许中杰,孔锦涛,等. 闽西南地区中侏罗世古气候演 化及其对华南构造体制转换的响应 [J]. 大地构造与成矿学, 2020,44(5):1012-1024.

> CHEN P R, XU Z J, KONG J T, et al. Paleoclimatic evolution during Middle Jurassic in southwestern Fujian and its responses to the tectonic regime transition in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(5): 1012-1024.

[16] 陈森然,许中杰,孔锦涛,等.华南陆缘粤南地区晚三叠世一 早、中侏罗世古气候演化及其对华南构造体制转换的响应[J].地球科学,2021,46(9):3290-3306.

> CHEN S R, XU Z J, KONG J T, et al. Paleoclimatic evolution during Late Triassic-Early-Middle Jurassic in South Guangdong of South China continental margin and its responses to the tectonic regime transition[J]. Earth Science, 2021, 46(9): 3290-3306.

- [17] 李祥辉,陈斯盾,曹珂,等.浙闽地区白垩纪中期古土壤类型与古气候[J].地学前缘,2009,16(5):63-70.
 LI X H, CHEN S D, CAO K, et al. Paleosols of the mid-Cretaceous: a report from Zhejiang and Fujian, SE China [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5):63-70.
- [18] 刘玲,李祥辉,王尹,等. 浙闽地区白垩纪早中期黏土矿物组成特征及其古气候显示 [J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 120-127.
 LIU L, LI X H, WANG Y, et al. The Early-Mid Cretaceous changes of clay mineral composition from Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: indications to paleoclimate changes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 120-127.
- [19] 刘友祥,胡文瑄,胡广.浙闽地区早白垩世暗色岩系的孢粉组 合与古气候特征 [J]. 高校地质学报, 2014, 20(4): 590-601. LIU Y X, HU W X, HU G. Spores and pollen assemblages and their paleo-climate implication from the Early Cretaceous dark mudstone in Zhejiang and Fujian Provinces[J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(4): 590-601.
- [20] CHARVET J, SHU L S, SHI Y S, et al. The building of South China: collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1996, 13(3/5): 223-235.
- [21] SHU L, CHARVET J. Kinematics and geochronology of the proterozoic Dongxiang-Shexian ductile shear zone: with HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan region, South China)[J]. Tectonophysics, 1996, 267(1/4): 291-302.
- [22] WANG X L, ZHOU J C, GRIFFIN W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. Precambrian Research, 2007, 159(1/2): 117-131.
- [23] WANG Y, FAN W, CAWOOD P A, et al. Indosinian highstrain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: kinematics and ⁴⁰Ar/ ³⁹Ar geochronological constraints [J]. Tectonics, 2007, 26(6): TC6008.
- [24] ZHOU J C, WANG X L, QIU J S. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: coeval arc magmatism and sedimentation[J]. Precambrian Research, 2009, 170(1): 27-42.
- [25] ZHONG D L. Paleotethysides in West Yunnan and Sichuan, China [M]. Beijing: China Science Press, 2000.
- [26] WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1273-1305.
- [27] LI J H, MA Z L, ZHANG Y Q, et al. Tectonic evolution of Cretaceous extensional basins in Zhejiang Province, eastern South China: structural and geochronological constraints[J]. International Geology Review, 2014, 56(13): 1602-1629.
- [28] LI X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(3): 293-305.
- [29] ZHOU X M, LI W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. Tectonophysics, 2000, 326(3):

269-287.

- [30] 毛景文,谢桂青,李晓峰,等.华南地区中生代大规模成矿作 用与岩石圈多阶段伸展[J].地学前缘,2004,11(1):45-55.
 MAO J W, XIE G Q, LI X F, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China.[J].
 Earth Science Frontiers, 2004, 11(1):45-55.
- [31] MAO J W, WANG Y T, LEHMANN B, et al. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29(3): 307-324.
- [32] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. International Union of Geological Sciences, 2006, 29(1): 26-33.
- [33] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. Geology, 2007, 35(2): 179-182.
- [34] HU R Z, BI X W, ZHOU M F, et al. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. Economic Geology, 2008, 103(3): 583-598.
- [35] SHU L S, ZHOU X M, DENG P, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: new insights from basin analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 376-391.
- [36] CHU Y, LIN W, FAURE M, et al. Cretaceous episodic extension in the South China Block, East Asia: evidence from the Yuechengling Massif of Central South China[J]. Tectonics, 2019, 38(10): 3675-3702.
- [37] LI J, CAWOOD P A, RATSCHBACHER L, et al. Building Southeast China in the Late Mesozoic: insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan Fault Zone[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 201: 103056.
- [38] YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. Tectonophysics, 2003, 361(3): 239-254.
- [39] LIN W, WANG Q C, CHEN K. Phanerozoic tectonics of South China Block: new insights from the polyphase deformation in the Yunkai massif [J]. Tectonics, 2008, 27(6): TC6004
- [40] LI J H, DONG S W, CAWOOD P A, et al. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 490: 170-179.
- [41] SUN W D, LING M X, YANG X Y, et al. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: an overview[J]. Science China (Earth Sciences), 2010, 53(4): 475-484.
- [42] WANG Z H, LU H F. Ductile deformation and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Changle–Nanao ductile shear zone, southeastern China[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22(5): 561-570.
- [43] WEI W, FAURE M, CHEN Y, et al. Back-thrusting response of continental collision: Early Cretaceous NW-directed thrusting in

the Changle-Nan'ao Belt (Southeast China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 100: 98-114.

- [44] 祖辅平,舒良树,李成. 永安盆地晚古生代一中一新生代沉积 构造环境演化特征 [J]. 地质论评, 2012, 58(1): 126-148.
 ZUFP, SHULS, LIC. Evolution features of depositional and tectonic setting from Late Paleozoic to Meso-Cenozoic in the Yong'an Basin[J]. Geological Review, 2012, 58(1): 126-148.
- [45] HUL S, CAWOOD P A, DU Y S, et al. Late Paleozoic to Early Mesozoic provenance record of paleo-Pacific subduction beneath South China[J]. Tectonics, 2015, 34(5): 986-1008.
- [46] 陈金秀. 福建省永安盆地第四纪冰川遗迹的探讨 [J]. 福建地 质, 1984 (1): 61-67.
 - CHEN J X. Exploration of Quaternary glacier relics in Yong'an Basin, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 1984(1): 61-67.
- [47] 李兼海. 福建省岩石地层 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1997.

LI J H. Geological Strata of Fujian Province [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1997.

- [48] XU Q J, LIU S F, WANG Z F, et al. Provenance of the East Guangdong Basin and Yong'an Basin in Southeast China: response to the Mesozoic tectonic regime transformation[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 185: 104024.
- [49] LI X H, ZHANG C K, LI Y X, et al. Refined chronostratigraphy of the Late Mesozoic terrestrial strata in South China and its tectono-stratigraphic evolution[J]. Gondwana Research, 2019, 66: 143-167.
- [50] FREYDIER R, MICHARD A, DE LANGE G, et al. Nd isotopic compositions of eastern Mediterranean sediments: tracers of the Nile influence during sapropel S1 formation?[J]. Marine Geology, 2001, 177(1): 45-62.
- [51] 赵振华. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.

ZHAO Z H. Geochemistry of trace elements [M]. Beijing: Science Press, 2016.

- [52] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [53] 何岸北.东南沿海古海岸山脉演化:永安盆地晚中生代沉积 及古气候响应 [D]. 广州:中国科学院大学 (中国科学院广州 地球化学研究所), 2022.

HE A B. Evolution of Paleo-Coastal Mountains along the Southeast Coast: Sedimentation and Paleoclimate Response in Yong'an Basin of the Late Mesozoic [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2022.

- [54] MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics [M]//JOHNSSON M J, BASU A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geological Society of America, 1993: 21-40.
- [55] CHEN J, AN Z S, HEAD J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of Central China during the last

第40卷第12期

130, 000 years and their implications for monsoon paleoclimatology[J]. Quaternary Research, 1999, 51(3): 215-219.

- [56] CHEN J, WANG Y J, CHEN Y, et al. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess stratigraphy and its implications for palaeomonsoon climate[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2000, 74(2): 279-288.
- [57] 田景春,张翔. 沉积地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2016.
 TIAN J C, ZHANG X. Sedimentary geochemistry [M]. Beijing: Geology Press, 2016.
- [58] 田晓雪, 雒昆利, 谭见安, 等. 黑龙江嘉荫地区白垩系与古近 系界线附近的古气候分析 [J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 425-432.

TIAN X X, LUO K L, TAN J A, et al. Analysis on palaeoclimate neighbouring the Cretaceous and Paleogene boundary in Jiayin area, Heilongjiang Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3): 425-432.

- [59] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁 群沉积环境中的应用 [J]. 同济大学学报, 1979(2): 51-60. WANG Y Y, GUO W Y, ZHANG G D. Application of some geochemical indicators in determiring of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jinhu Depression, Kiangsu Province[J]. Journal of Tongji University, 1979(2): 51-60.
- [60] 王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复: 以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例 [J]. 新疆石油地质, 2005, 26(6): 117-120.

WANG M F, JIAO Y Q, WANG Z H. Recovery paleosalinity in sedimentary environment: an example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(6): 117-120.

- [61] WRIGHT J, SCHRADER H, HOLSER W T. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(3): 631-644.
- [62] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1): 111-129.
- [63] WIGNALL P B, TWITCHETT R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. Science, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [64] 吴朝东,杨承运,陈其英. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因 意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(1): 28-29, 31-41.
 WU C D, YANG C Y, CHEN Q Y. The origin and geochemical characteristics of Upper Sinain Lower Cambrian black shales in western Hunan [J]. Acta Petrologica et Mineralogica1999, 18 (1): 28-29, 31-41.
- [65] RIMMER S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. Chemical Geology, 2004, 206(3): 373-391.
- [66] SCHEFFLER K, BUEHMANN D, SCHWARK L. Analysis of late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies: response to climate evolution and sedimentary environment[J]. Palaeogeography, Palaeo-

climatology, Palaeoecology, 2006, 240(1): 184-203.

- [67] 彭华, 吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨 [J]. 中山 大学学报 (自然科学版), 2003, 42(5): 109-113.
 PENG H, WU Z C. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni, 2003, 42(5): 109-113.
- [68] DOUGLAS P M J, BRENNER M, Curtis J H. Methods and future directions for paleoclimatology in the Maya lowlands[J].
 Global and Planetary Change, 2016, 138: 3-24.
- [69] 刘秀铭, 吕镔, 毛学刚, 等. 风积地层中铁矿物随环境变化及 其启示 [J]. 第四纪研究, 2014, 34(3): 443-457.
 LIU X M, LYV B, MAO X G, et al. Iron minerals of aeolian deposits vary with environment and its significances[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(3): 443-457.
- [70] TEWARI R, CHATTERJEE S, AGNIHOTRI D, et al. Glossopteris flora in the Permian Weller Formation of Allan Hills, South Victoria Land, Antarctica: implications for paleogeography, paleoclimatology, and biostratigraphic correlation[J]. Gondwana Research, 2015, 28(3): 905-932.
- [71] 邓胜徽, 卢远征, 赵怡, 等. 中国侏罗纪古气候分区与演变 [J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 106-142.
 DENG S H, LU Y Z, ZHAO Y, et al. The Jurassic palaeoclimate regionalization and evolution of China[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(1): 106-142.
- [72] 岳来群, 游国庆, 郑宁, 等. 福建坂头组沉积特征及构造背景 研究 [J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1220-1231.
 YUE L Q, YOU G Q, ZHENG N, et al. Sedimentary characteristics and tectonic background of Bantou period in Fujian[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1220-1231.
- [73] 梁诗经,文斐成,陈润生,等. 福建泰宁白垩纪红层植物及孢粉化石组合特征 [J]. 福建地质, 2006(1): 1-9.
 LIANG S J, WEN F C, CHEN R S. The assemblage and characters of floras and sporo-pollen fossils in the Cretaceous red-bed basin of Taining County, Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 2006(1): 1-9.
- [74] 福建省地质调查研究院. 中国区域地质志: 福建志 [M]. 北京: 地质出版社, 2016.

Fujian Institute Of Geological Survey. Regional Geology of China: Fujian Province [M]. Beijing: Geology Press, 2016.

- [75] HU G, HU W X, CAO J, et al. Deciphering the Early Cretaceous transgression in coastal southeastern China: constraints based on petrography, paleontology and geochemistry[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 317/318: 182-195.
- [76] 刘静,张金玉,葛玉魁,等.构造地貌学:构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究 [J].科学通报, 2018, 63(30): 3070-3088.
 LIU J, ZHANG J Y, GE Y K, et al. Tectonic geomorphology: an interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(30): 3070-3088.
- [77] 刘芮岑. 湖南茶陵盆地晚白垩世一古新世古气候分析 [D]; 南京大学, 2018.

LIU R C. Paleoclimate of the Late Cretaceous-Paleocene in the Chaling Basin, Hunan, South China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.

[78] 黄乐清,黄建中,罗来,等. 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, 2019, 37(4): 735-748.

HUANG Y Q, HUANG J Z, LUO L, et al. The discovery of Cretaceous eolian deposits at the eastern margin of the Hengyang Basin, Hunan, and its paleoenvironmental significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(4): 735-748.

- [79] TENG X H, FANG X M, KAUFMAN A J, et al. Sedimentological and mineralogical records from drill core SKD1 in the Jianghan Basin, Central China, and their implications for late Cretaceous-Early Eocene climate change[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 182: 103936.1-103936.14.
- [80] CHEN L Q, STEEL R J, GUO F S, et al. Alluvial fan facies of the Yongchong Basin: implications for tectonic and paleoclimatic changes during Late Cretaceous in SE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 134: 37-54.
- [81] 李余亮. 广东省韶关市丹霞盆地长坝组沉积特征与古气候研究 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2018.
 LI Y L. Sedimentary Characteristics and Paleoclimate of the Changba Formation in the Danxia Basin, Shaoguan City, Guangdong Province, South China [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2018.
- [82] 王文艳, 刘秀铭, 马明明, 等. 南雄盆地白垩纪红层沉积环境 分析 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(3): 29-37.

WANG W Y, LIU X M, MA M M, et al. Sedimentary environment of Cretaceous red beds in Nanxiong Basin, Guangdong Province[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2016, 11(3): 29-37.

- [83] 张哲. 三水盆地下白垩统一始新统黏土矿物特征及其对区域 构造-气候事件的响应 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2018. ZHANG Z. Clay Mineral Characteristics of Sanshui Basinfrom-Lower Cretaceous to Eocene and Their Response to Tectonic Activities and Climate Changes in the Region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [84] 梁西文. 中扬子区晚三叠世—新近纪层序岩相古地理演化研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
 LIANG X W. Study on Lithofacies Paleographic Evolution of Late Triassic-Neogene Sequence in Mid-Yangtze Region [D].
 Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [85] 王宇佳. 江西广丰晚白垩世周田组沉积特征与古气候分析 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2019.

WANG Y J. Sedimentary Characteristics and Paleoclimate of the Zhoutian Formation in the Guangfeng Basin of Jiangxi Province [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2019

[86] 刘友祥. 浙闽地区下白垩统暗色岩系的沉积环境研究 [D]. 南京: 南京大学, 2012.

LIUY X. Study of Sedimentary Environment of Dark Sedimentary Rocks in Lower Cretaceous, Zhejiang and Fujian Provinces [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.

Cretaceous paleoclimate evolution of Yong'an Basin in western Fujian and its response to geomorphic changes along the coast of South China

HE Anbei^{1,2,3,4}, ZHU Zuofei^{1,5}, ZHAO Qi¹

(1 Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2 Center for Excellence in Deep Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 5 Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, China)

Abstract: To explore the evolution characteristics of the Cretaceous paleoclimate in the Yong'an Basin in western Fujian and the influence of the Late Mesozoic geomorphic changes along the coast of South China on the paleoclimate in the southeastern margin of South China, the Cretaceous stratigraphy of the Bantou, Shaxian, and Chong'an formations in the basin was taken as the research object. The fine-grained clastic rock samples were collected and examined for major and trace elements and rare earth elements distributions, and their sedimentary and paleontological characteristics were compared and analyzed. Variations in the paleoclimate of the Yong'an Basin in western Fujian during the Cretaceous period were clarified. Results show that the early Cretaceous Bantou Formation reflects a changing climate condition. The value ranges of CIA (chemical index of alteration) $(69.91 \sim 85.29)$, Rb/Sr (1.13 $\sim 2.21)$, Mg/Ca (0.57 ~ 3.57), Sr/Cu (5.44 ~ 11.66), and the calibrated paleosalinity index $[100*Sr/(BaAl_2O_3)]$ (CPI) $(1.18 \sim 1.55)$ collectively suggest a scheme transition from a warm-humid climate to a dry-hot environment. Moreover, the redox discrimination indices δCe (0.89 \sim 1.03), V/Cr (1.03 \sim 1.57), and Ni/Co $(2.34 \sim 10.58)$ signaled a dominant weak oxidation environment, aligning with the transition to dry-hot climate in the early Cretaceous. Moving to the late Early Cretaceous to Late Cretaceous, Shaxian Formation and Chong'an Formation samples manifest further shifts in climate dynamics. The value ranges of CIA $(67.14 \sim 75.68)$, Rb/Sr $(0.99 \sim 9.05)$, Mg/Ca $(0.37 \sim 16.22)$, Sr/Cu $(1.20 \sim 15.46)$, and CPI (0.50 - 1.77) expose a change from hot-dry to warm-humid, followed by a transition to cold-dry climate. The δCe value (0.89 \sim 1.03), V/Cr ($0.51 \sim 1.72$), and Ni/Co ($1.45 \sim 6.45$) point to alternating weak oxidation and weak reduction environments, aligning with the multiple climate shifts during this period. Therefore, the Cretaceous paleoclimate of the Yong'an Basin exhibits a complex transitional sequence in climate, oscillating from dry-hot to warm-humid and then to drycold conditions, often with extreme climates. By comparing the paleoclimate between the study area and the surrounding South China region, it is evident that the predominant transformation in the inland South China paleoclimate was from warm-wet to dry-hot conditions. The paleoclimate transitions between the coastal and inland regions of South China reflect the response to late Mesozoic coastal geomorphic changes in the South China coastal areas.

Key words: western Fujian; Cretaceous; geochemistry; paleoclimate; paleogeomorphology; geochemistry