

上扬子盆地西缘晚白垩世物源变化及指示

姜磊, 刘树根, 王自剑, 李智武, 赖东, 何宇, 罗强, 周政, 邓宾

成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都, 610059

内容提要:对上扬子盆地西缘的上白垩统—古近系剖面开展沉积构造研究、传统重矿物分析、金红石微量元素地球化学研究。研究发现:①晚白垩世晚期,柳嘉剖面出现中酸性岩浆岩指数(ATi)升高和中低级变质岩指数(GZi)升高,宜就剖面出现中酸性岩浆岩指数(ATi)升高;柳嘉剖面富含石榴子石是与宜就剖面最大的不同。②柳嘉剖面和宜就剖面金红石母岩类型均主要为泥质变质岩,以角闪岩相/榴灰岩相为主。晚白垩世晚期,柳嘉剖面麻粒岩相达到最大,为39%,宜就剖面麻粒岩相出现最小值,达到13%,上扬子盆地西缘的麻粒岩相变化趋势的差异是物源差异的一种表现。③上扬子盆地西缘的晚白垩世物源变化揭示出松潘—甘孜褶皱带和龙门山构造带在晚白垩世晚期发生大规模快速隆升剥蚀事件。

关键词:上扬子;重矿物;白垩系;物源;金红石

区域地层和沉积学研究(四川盆地陆相中生代地层古生物编写组,1982;郭正吾等,1996;许效松等,1997;王二七和尹纪云,2009;Carroll et al., 2010)表明,上扬子盆地中生代范围广阔,现今的四川盆地与其南侧的西昌盆地和楚雄盆地连为一体,并可能一直持续到晚白垩世。据前人资料,川西地区晚三叠世须家河组沉积期物源主要来自松潘—甘孜的沉积再旋回,须家河组沉积末期物源包含了龙门山和康定杂岩的贡献(邓康龄,2007;邓飞等,2008;郑荣才等,2009;施振生等,2010;李勇等,2010;陈斌等,2016),须家河组末期—侏罗纪的砂岩普遍出现的变质矿物石榴子石主要来自龙门山北段(郭正吾等,1996;许效松等,1997),推测白垩纪之前龙门山北段变质岩可能已经剥露。相关的裂变径迹(李智武等,2010;Li Zhiwu et al., 2012)研究发现龙门山在白垩纪约100 Ma出现快速隆升。Deng Bin等(2012)研究认为100 Ma左右是古特提斯到新特提斯的构造转换的关键,是青藏高原东缘的重要事件。基于红参1井的磷灰石裂变径迹热史模拟研究(Peter et al., 2013)发现松潘甘孜褶皱带的若尔盖地区晚白垩世存在区域隆升和剥蚀。许志琴等(2016)认为松潘—甘孜地体白垩纪可能存在一个造山的高原。沉积物是造山带—沉积盆地间物质与

能量交换的基本介质,物源分析是开展古气候、古地理恢复和研究盆地构造演化的重要手段(汪正江等,2000;赵红格和刘池洋,2003;徐亚军等,2007),沉积盆地内沉积物的巨大变化往往是物源区改变的结果,新剥蚀区的出现、源区剥蚀速率的改变等均会引起沉积物成分或含量的改变,因此研究上扬子盆地白垩纪碎屑岩重矿物的变化,不仅可以加深对上扬子盆地白垩纪演化的认识,而且对研究青藏高原东缘生长过程具有重要的科学意义。

1 区域地质背景

上扬子克拉通盆地(图1)是一个周缘活动主控下的叠合盆地(刘树根等,2018),盆地西南界为哀牢山—红河断裂带,西北界为龙门山—锦屏山—玉龙山断裂带,北界为城口—房县—襄广断裂,东南界为雪峰隆起带(郭正吾等,1996;潘桂棠等,2009)。上扬子盆地的沉积层主要分为海相沉积层(震旦系—中三叠统)和陆相沉积层(上三叠统—第四系)。印支运动使得上扬子盆地在晚三叠世结束海相沉积并转入陆相沉积阶段,侏罗纪盆地的范围涵盖了现今的江汉盆地、四川盆地、西昌盆地、楚雄盆地、兰坪—思茅盆地等广大地区(郭正吾等,1996;许效松等,1997)。燕山运动使得上扬子盆地侏罗

注:本文为四川省青年基金项目(编号:2017JQ0025)、国家自然科学基金资助项目(编号:41572111, 41402119和41472107)的成果。

收稿日期:2018-05-13;改回日期:2019-02-20;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2019.02.017

作者简介:姜磊,男,1981年生,博士研究生,页岩气地质、构造地质专业,Email:47047999@qq.com。通讯作者:邓宾,男,1980年生,博士,教授,主要从事含油气盆地分析研究,Email: dengbin13@mail.cdut.edu.cn。

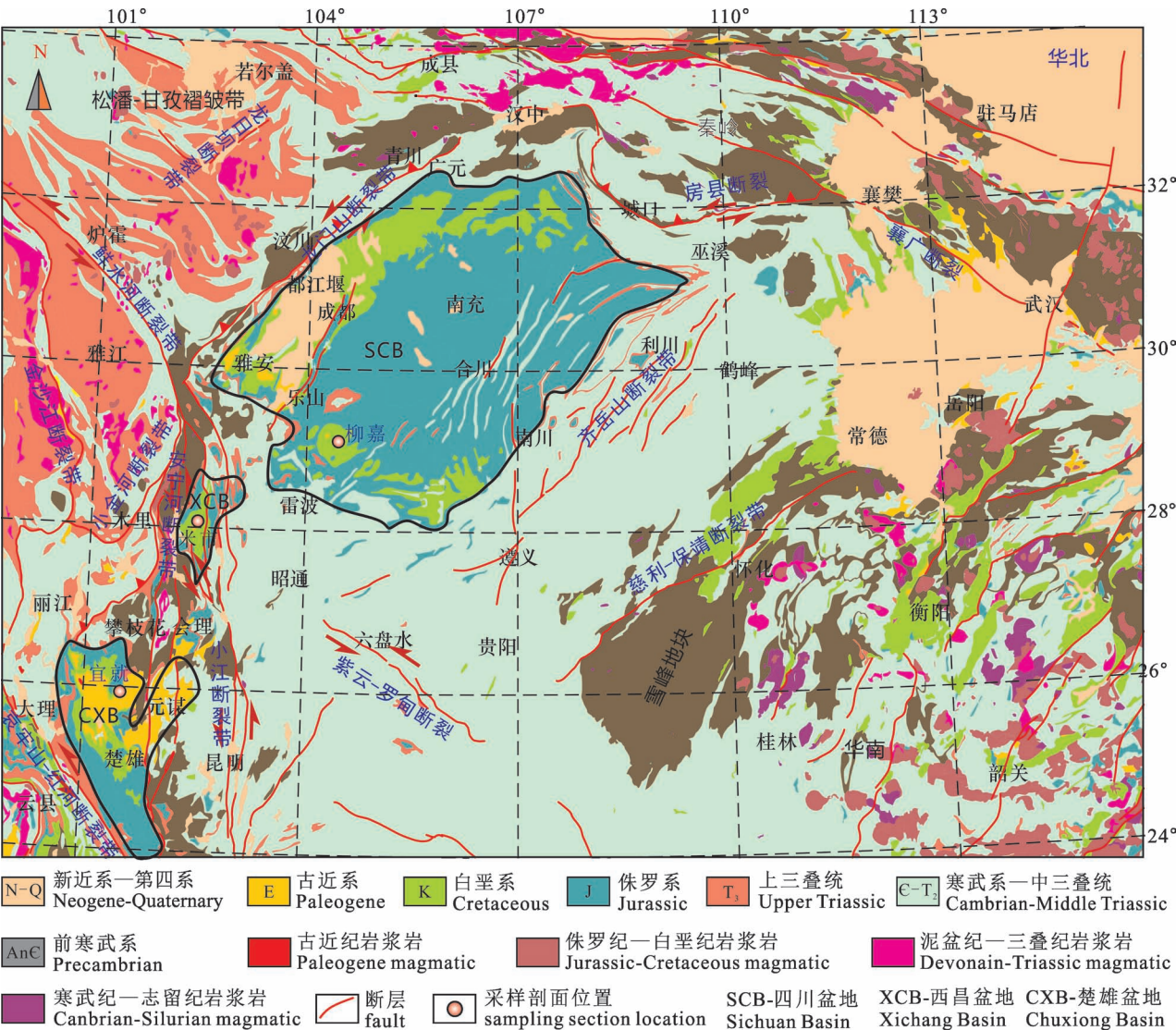


图 1 上扬子盆地及邻区构造简图及研究剖面位置

Fig. 1 Structural map and research section positions in the Upper Yangtze Basin and adjacent areas

纪末期—白垩纪不断向西收缩,并导致白垩系与侏罗系、白垩系上统与下统之间普遍呈现不整合(多为平行不整合)接触。白垩纪早期盆地存在多个沉积中心,如现今的江汉盆地、四川盆地的大巴山前缘和龙门山前缘、西昌—楚雄盆地、兰坪—思茅盆地等,主要为河流—湖泊相沉积。白垩纪晚期盆地范围更加缩小,四川地区沉积中心迁移至成都—宜宾—古蔺一带,沉积相也产生变化,主要为沙漠相沉积;西昌—楚雄地区仍为河流相—湖相沉积。白垩纪末期含膏盐沉积的出现(如:四川盆地灌口组、西昌盆地的小坝组、楚雄盆地江底河组)暗示盆地逐渐封闭,可见白垩纪晚期可能是上扬子盆地地质发展中的一个重要转折时期(周名魁等,1988;辜学达

等,1997;郭正吾等,1996;许效松等,1997)。

参考 1:20 万宜宾幅、冕宁幅、大姚幅等地质资料,本文以四川盆地南部宜宾柳嘉剖面(以下简称柳嘉剖面)、楚雄盆地北部大姚宜就剖面(以下简称宜就剖面)为主,辅以西昌盆地喜德县米市剖面(以下简称米市剖面),研究各地区白垩纪晚期的沉积构造和沉积物重矿物变化,探讨物源的来源、变化及意义。

川南柳嘉地区晚白垩世主要为沙漠沉积环境(李玉文等,1988;江新胜等,1999,2003)。柳嘉剖面下白垩统缺失,上白垩统依次为窝头山组、打儿函组(二者相当于川西夹关组),三合组、高坎坝组(二者相当于川西灌口组),均为连续沉积(图 2)。窝头

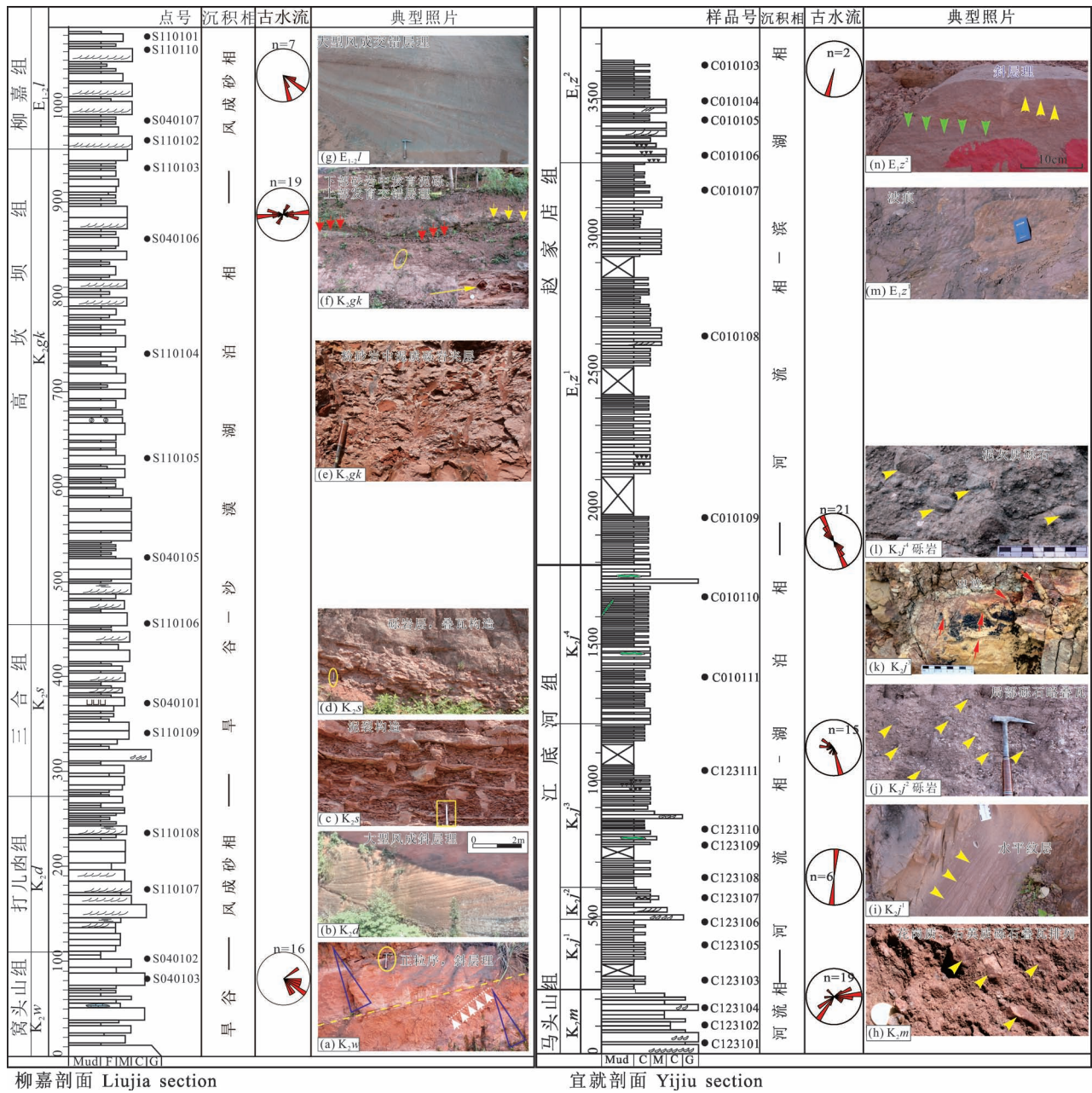


图 2 上扬子盆地西缘柳嘉剖面和宜就剖面沉积柱状图

Fig. 2 Sedimentary histogram of Liujia section and Yijiu section in the western margin of Upper Yangtze Basin

山组上部为旱谷沉积,岩性主要为砖红色厚层—块状不等粒砂岩,夹粉砂岩、泥岩,底部为含砾砂岩—砾岩,发育平行层理和斜层理(图 2a),斜层理恢复出古流向大致为北西—南东向。打儿函组主要为风成砂沉积,岩性主要为砖红色块状不等粒石英岩屑砂岩,风成大—巨型斜层理或交错层理十分发育(图 2b)。三合组—高坎坝组主要为旱谷—沙漠湖沉积。三合组岩性以砖红色薄至中厚层状不等粒岩屑长石砂岩为主,夹多层不等厚的紫红色泥岩,砂岩中局层段出现泥裂构造(图 2c),向上发育河道砾石层(图 2d)。高坎坝组主要为一套砖红色厚层—块状岩屑长石砂岩,砂岩中夹泥质砾岩透镜体(图 2e);上部发育斜层理、交错层理,局部仍见泥砾,颗粒大小较下部变小(图 2f),交错层理指示古流向杂乱,主体为近东西方向。古近系柳嘉组为风成砂沉积,岩性主要为砖红色厚层—块状中—细粒岩屑长石石英砂岩,发育巨型板状斜层理、槽状交错层理(图 2g),斜层理恢复出古风向主要为北北西—南南

东向。总体上,川南柳嘉地区晚白垩世的物源主要来自北西方向(图2)。

楚雄盆地北部宜就地区晚白垩世主要为河湖相沉积(图2)。上白垩统依次为马头山组和江底河组。马头山组以河流相沉积为主;下部岩性为浅肉红色长石岩屑细砾岩—含砾石粗砂岩,砾石颗粒成分以石英为主,部分层段可见花岗质砾石(图2h),磨圆较好,应为远距离搬运沉积,具正粒序、底冲刷发育等沉积构造;上部变为红色—浅黄色含砾泥岩;砾石叠瓦构造揭示出其古流向总体为近北西—南东向。江底河组由河流相过渡为滨浅湖相沉积;江底河组一段为紫红色泥岩—含粉砂泥岩,下部纹层发育(图2i),局部发育方解石充填晶洞,上部粉砂含量略有增加;二段主体为粉砂岩—泥质粉砂岩,上部粉砂岩中出现多套中砂质砾岩夹层(图2j),厚度约为10 cm、20 cm、50 cm、100 cm不等,砾石成分为石英质和花岗质;三段主要为紫红色泥质粉砂岩—粉砂质泥岩、灰黄色钙质泥岩—粉砂质泥岩,出现虫迹(图2k)及湖底斜坡扰动滑脱变形构造,局部出现泥灰质砾石层(图2l);四段中发育两套粉砂岩—泥岩的沉积旋回。古近系赵家店组以滨湖相沉积为主,岩性以粉砂岩、泥岩和膏盐层系为主;赵家店组发育波痕(图2m)和斜层理(图2n)等沉积构造,波痕恢复出古流向为北西向或南东向,斜层理指示古流向为南南西方向。总体上,楚雄盆地晚白垩世古流向是变化的,主体为自北向南(图2)。

2 沉积物重矿物分析

沉积物重矿物具有化学性质稳定,抗风化能力强的特点,可保留许多与沉积环境和构造运动相关的地质信息。重矿物特征与母岩性质有着密切的关系,能够较好地反映物源区母岩的特征,其类型组合、含量变化及单矿物成分差异是追溯物源和判别源岩的指示剂(Pettijohn et al., 1965; Morton and Hallsworth, 1999; Von and Gaupp, 1999)。构造活动可以引起沉积地层中重矿物含量及组合的改变,这为判别物源区位置及构造活动提供重要线索。

2.1 指示性矿物和组合矿物分析

所有样品共鉴定出重矿物约18种(表1),主要有锆石、金红石、锐钛矿、电气石、石榴子石、磁铁矿、铬铁矿、赤褐铁矿、褐铁矿、钛铁矿、独居石等、角闪石、绿帘石、辉石、重晶石等。所有样品的重矿物中铁的氧化物含量均较高,赤褐铁矿、钛铁矿、磁铁矿合计占比达到62.29%~92.77%。

柳嘉剖面常见重矿物(表1)主要有钛铁矿(26.46%~67.80%,均值46.25%)、赤褐铁矿(12.94%~54.25%,均值31.86%)、锆石(2.66%~13.36%,均值8.53%)、石榴子石(0.59%~15.96%,均值5.16%,粉色为主),还有磁铁矿、白钛石、电气石、金红石、锐钛矿、磷灰石、独居石等,此外部分样品出现了铬铁矿、角闪石、辉石、绿帘石、黄铁矿等。其特征重矿物组合为钛铁矿—赤褐铁矿—锆石—石榴子石,指示性矿物为变质矿物石榴子石。宜就剖面常见重矿物(表1)主要有赤褐铁矿(22.52%~91.25%,均值67.58%)、钛铁矿(0~54.36%,均值15.02%)、锆石(5.05%~22.97%,均值11.04%),还有白钛石、锐钛矿、金红石、磁铁矿、电气石、独居石、铬铁矿、磷灰石、石榴子石(检测到矿物颗粒)等,部分样品出现了辉石、绿帘石、角闪石、重晶石、黄铁矿等。其特征重矿物组合为赤褐铁矿—钛铁矿—锆石。石榴子石是片岩、片麻岩等区域变质岩中的常见矿物,钛铁矿则常出现在岩浆岩及岩浆岩的中高级变质岩中。碎屑重矿物组合往往是母岩类型的反映(Pettijohn et al., 1965),柳嘉剖面的重矿物组合暗示其母岩富含变质岩、岩浆岩,宜就剖面的母岩则主要为沉积岩和岩浆岩。

重矿物含量的急剧变化或新矿物的出现往往指示物源的改变,因此研究白垩系—古近系剖面的重矿物的变化可以揭示出其物源改变的时限。①柳嘉剖面(表1):上白垩统高坎坝组砂岩(样品S110106)重矿物中出现石榴子石含量最大值(15.96%)、磷灰石含量最大值(1.25%)、锐钛矿含量最大值、电气石含量很低、磁铁矿含量低、锆石含量显著下降(4.18%);古近系砂岩(样品S110102)电气石和磁铁矿含量显著增加、磷灰石和独居石明显下降;以上重矿物的变化表明四川盆地晚白垩世高坎坝组沉积期的物源相对其前后时期存在较大变化。②宜就剖面(表1):上白垩统磷灰石、独居石含量远高于古近系;江底河组三段底部(样品C123108)出现多种重矿物的高峰值,如锆石(18.67%)、金红石(2.42%)、锐钛矿(4.49%)、磷灰石(0.69%)、独居石(0.94%)、铬铁矿(0.31%)等;宜就剖面重矿物的变化表明楚雄盆地的物源体系在江底河组沉积期有较大调整,大致在江底河组三段—四段沉积期,楚雄盆地源区的岩浆岩的增加明显。

参考1:20万区域地质报告(如大姚幅、宜宾幅等)并结合重矿物的含量变化特点将上白垩统划

表 1 上扬子盆地西缘各剖面主要重矿物质量百分含量表(%)

Table 1 Mass percentage of major heavy minerals in each section on the western margin of Upper Yangtze Basin (%)													
样品编号	层位	锆石	电气石	金红石	锐钛矿	磷灰石	独居石	铬铁矿	白钛石	石榴子石	钛铁矿	磁铁矿	赤褐铁矿
S110101	E ₁₋₂ l	5.55	3.00	0.96	0.75	0.02	0.02	0.00	3.11	6.33	24.42	1.59	54.25
S110110	E ₁₋₂ l	5.93	0.04	1.46	0.67	0.34	0.02	0.00	2.8	2.45	56.27	9.53	20.48
S040107	E ₁₋₂ l 下	9.55	2.13	0.95	0.21	0.00	>0	0.00	3.14	4.50	45.09	1.05	33.38
S110102	E ₁₋₂ l 底	2.66	1.76	0.8	0.37	0.12	0.04	0.00	2.22	6.69	30.62	9.37	45.34
S110103	K ₂ gk 顶	5.11	0.90	1.48	1.36	0.34	0.10	0.52	2.84	3.59	29.64	2.02	52.10
S040106	K ₂ gk 上	12.17	1.41	1.52	0.36	0.62	0.18	0.00	2.06	3.85	48.20	0.13	29.50
S110104	K ₂ gk 中上	9.33	0.51	1.46	0.57	1.01	0.04	0.00	1.46	13.23	26.46	1.60	44.33
S110105	K ₂ gk 中下	9.44	0.77	0.86	0.86	0.12	0.74	>0	1.86	10.55	46.30	2.13	26.37
S040105	K ₂ gk 下	11.72	0.09	1.02	0.03	0.03	0.22	0.00	1.28	3.65	43.66	1.33	36.98
S110106	K ₂ gk 底	4.18	0.06	1.25	0.84	1.25	0.06	>0	2.91	15.96	42.34	0.87	30.29
S040101	K ₂ s 上	7.57	0.05	2.62	0.01	0.05	0.13	0.00	1.23	2.33	67.80	0.21	18.00
S110109	K ₂ s 下	7.88	2.35	1.24	0.79	0.15	0.06	0.00	4.88	2.81	56.53	1.56	21.74
S110108	K ₁ d 顶	10.57	0.60	1.51	1.07	0.20	0.20	0.00	2.16	4.15	52.46	6.16	20.93
S110107	K ₁ d 中	11.68	0.14	1.72	0.86	0.07	0.10	0.00	2.58	0.65	53.69	15.57	12.94
S040102	K ₁ w 顶	13.36	1.32	1.79	0.01	0.18	0.15	0.00	4.98	1.23	42.37	0.21	34.39
S040103	K ₁ w 顶	9.77	2.03	1.99	0.36	0.49	0.13	0.17	10.11	0.59	45.62	0.04	28.70
C010103	E ₁₋₂ z ² 顶	15.54	0.04	0.64	1.85	0.04	0.10	>0	2.47	>0	7.00	1.68	70.64
C010104	E ₁₋₂ z ²	13.44	0.10	2.02	1.79	0.10	0.08	0.04	4.48	>0	6.27	1.22	70.45
C010105	E ₁₋₂ z ²	10.41	0.06	0.17	1.55	0.00	0.04	0.08	3.47	0.00	16.94	1.22	66.05
C010106	E ₁₋₂ z ² 底	11.94	0.10	1.40	0.18	0.05	0.04	0.04	2.46	0.00	21.43	0.62	61.73
C010107	E ₁₋₂ z ¹	10.99	0.02	1.30	2.12	0.02	>0	0.51	2.44	0.02	0.71	1.98	79.89
C010108	E ₁₋₂ z ¹ 中	6.60	0.06	0.12	0.88	0.00	0.02	0.21	3.06	0.00	11.31	0.75	76.98
C010109	E ₁₋₂ z ¹ 底	7.68	0.11	0.76	0.97	0.00	0.02	0.32	1.16	0.00	11.36	0.00	77.64
C010110	K ₂ j ⁴ 顶	5.05	>0	0.90	1.26	0.18	>0	>0	1.35	0.00	0.00	0.00	91.25
C010111	K ₂ j ⁴ 中	8.20	>0	0.73	0.81	0.61	0.51	0.08	0.51	0.00	6.58	0.00	81.98
C123111	K ₂ j ³	18.46	0.14	0.98	1.47	1.04	0.36	0.14	2.40	>0	1.07	0.31	73.64
C123110	K ₂ j ³	6.24	0.08	1.63	1.49	0.41	0.02	0.02	3.80	>0	1.06	1.79	83.45
C123109	K ₂ j ³ 底	13.02	0.06	1.12	1.49	0.52	0.21	>0	1.67	>0	16.94	0.13	64.85
C123108	K ₂ j ³ 底	18.67	0.26	2.42	4.49	0.69	0.94	0.31	5.53	0.00	24.57	0.00	42.11
C123107	K ₂ j ² 顶	5.50	0.18	0.33	0.53	0.22	0.18	0.42	1.07	>0	29.07	0.04	62.45
C123106	K ₂ j ¹ 顶	12.28	0.04	0.91	1.14	0.16	0.02	0.20	1.95	>0	29.47	0.77	53.05
C123105	K ₂ j ¹ 中	5.31	0.51	1.11	0.58	0.61	>0	0.00	0.71	>0	31.91	0.00	59.27
C123103	K ₂ j ¹ 底	7.59	0.10	1.21	1.56	0.35	0.02	0.02	3.49	>0	20.62	1.03	64.00
C123104	K ₂ m 顶	6.31	0.02	0.36	0.22	0.04	>0	>0	0.29	>0	1.21	2.15	89.41
C123102	K ₂ m	22.97	0.79	1.46	1.49	>0	0.51	0.04	1.72	>0	8.56	2.31	60.15
C123101	K ₂ m 底	14.60	2.43	2.13	1.62	>0	>0	>0	2.03	>0	54.36	0.30	22.52

注:>0 表示仅仅检测到矿物颗粒。

分为两段,柳嘉剖面将窝头山组、打儿凶组划为下段,三合组、高坎坝组划为上段;宜就剖面则将马头山组上部、江底河组一段—二段划为下段,将江底河组三段—四段划为上段。分别统计上白垩统的下段、上段和古近系的各重矿物含量范围和平均值,用重矿物平均值柱状图来对比和分析其变化规律(图 3):①总体上,柳嘉剖面与宜就剖面相比,石榴子石、钛铁矿、磁铁矿的含量高,赤褐铁矿、铬铁矿含量低。②两剖面磷灰石、独居石均呈先增后减的趋势,上白垩统上段含量最高,柳嘉剖面在上白垩统上段石榴子石含量最高。③柳嘉剖面石榴子石含量远远高于宜就剖面。

2.2 重矿物特征指数分析

自然环境中水动力作用和埋藏成岩作用是影响物源信息的两个主要因素。重矿物的水动力特性受控于颗粒大小、密度、形状,具有相似的颗粒大小和密度的重矿物之间的比值将不易受水动力条件变化的影响,能够更好地反映物源区特征。这些比值称为重矿物特征指数(Morton et al., 1991, 1994, 1995, 1999),主要有 ZTR 指数、ATi 指数、GZi 指数和 RuZi 指数等。ZTR 指数代表重矿物的成熟度,其数值愈大,则成熟度愈高,指示沉积物的搬运距离愈远。当受风化作用影响较弱时,ATi 指数、GZi 指数、RuZi 指数能较好的反映物源信息,其中 ATi = 100×

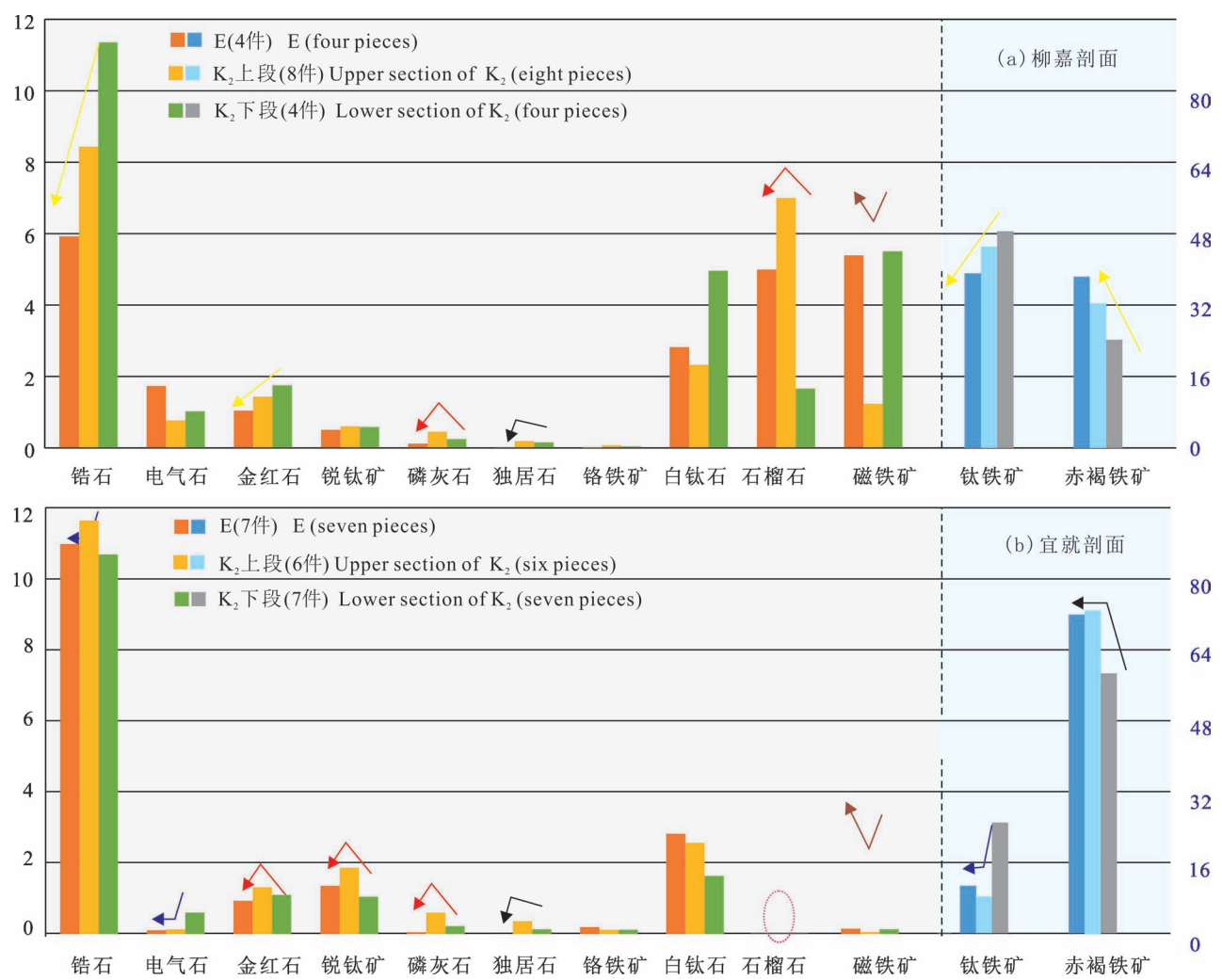


图3 上扬子盆地西缘柳嘉剖面和宜就剖面上白垩统—古近系重矿物平均含量柱状图

Fig. 3 Histogram of mean value of heavy minerals from Upper Cretaceous to Paleogene in Liujia section and Yijiu section in the western margin of Upper Yangtze Basin

磷灰石/(磷灰石+电气石),主要反映中酸性岩浆岩物源;GZi=100×石榴子石/(石榴子石+锆石),主要反映中低级变质岩物源;RuZi=100×金红石/(金红石+锆石),主要反映中高级变质岩物源信息。

柳嘉剖面(图4),高坎坝组底部样品S0110106,ATi、GZi和RuZi为高峰值,ZTR减小。ZTR值小通常意味着物源区相距沉积区不远,剥蚀物未经历长距离的风化作用和水动力搬运过程。ATi、GZi和RuZi高值表明母岩的中酸性岩浆岩、中低级变质岩、中高级变质岩均明显增加。柳嘉组(E₁₋₂l)底部样品S040107,ZTR增大,ATi、GZi和RuZi大幅降低,表明柳嘉组沉积早期母岩的岩浆岩和变质岩显著下降。宜就剖面(图4),晚白垩世ATi指数普遍较高,江底河组三段(样品C123110)

持续到江底河组四段(样品C010110),ATi指数升高至80%以上(图4),表明楚雄盆地在晚白垩世中酸性岩浆岩物源持续供给,并在晚白垩世晚期显著增加,这与野外露头上马头山组(K₂m)、江底河组(K₂j)内均发现花岗质砾石具一致性。古近系赵家店组一段(E₁z¹)(样品C010109和C010108)ATi指数的锐减表明古近纪早期源区的中酸性岩浆岩锐减。宜就剖面普遍石榴子石含量极低,GZi指数接近于0,表明其缺乏变质岩的源区。

综上,柳嘉剖面晚白垩世晚期(K₂gk)出现石榴子石矿物的显著增加、ATi和GZi指数快速升高,宜就剖面晚白垩世砂岩普遍存在花岗质砾石、ATi指数在晚白垩世晚期(K₂j³—K₂j⁴)普遍大于80%,以上现象均揭示出在晚白垩世晚期上扬子盆地西缘的

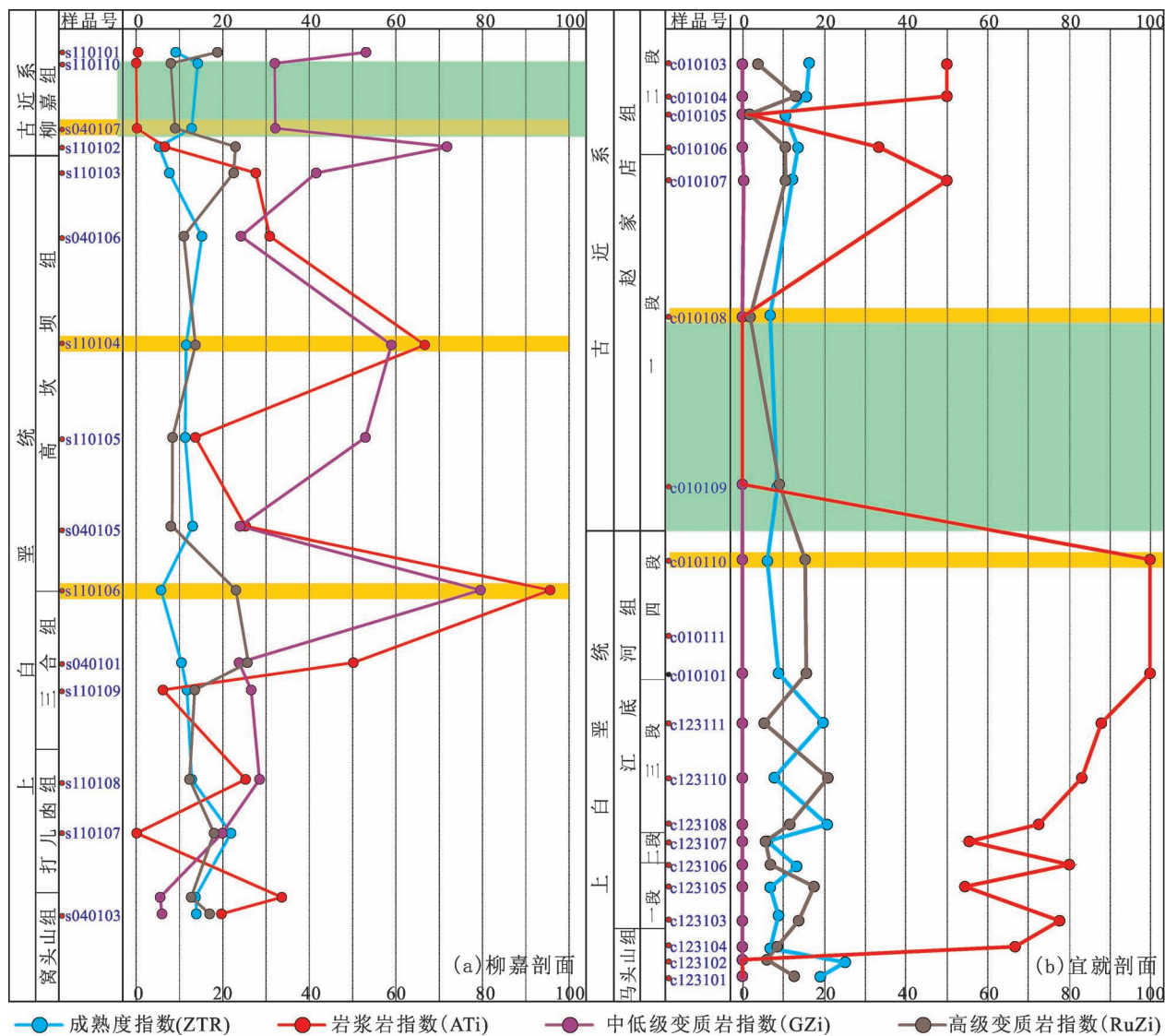


图 4 上扬子盆地西缘柳嘉和宜就剖面晚白垩世砂岩重矿物指数图

Fig.4 Diagram of heavy mineral index in Late Cretaceous sandstones in Liujia section and Yijiu section in the western margin of Upper Yangtze Basin

物源发生改变,主要表现为母岩的中酸性岩浆岩增加,局部地区(如川南宜宾地区)母岩的变质岩显著增加。

3 金红石地球化学和温度计

3.1 金红石微量元素

金红石、锆石和电气石是沉积和成岩过程中最稳定的重矿物 (Morton and Hallsworth, 1999),即使经历深埋藏成岩作用,金红石仍然可以提供有价值的源区信息。金红石的化学成分是 TiO_2 ,广泛分布于各种中高级变质岩中 (Force, 1980),常见于角闪岩、榴辉岩、片岩、片麻岩、麻粒岩及变质灰岩等

(Frost, 1991)。变质岩中金红石是 Ti、Nb、Ta、Mo、Sn、Sb 和 W 的主要载体。其中 Cr、Nb、Ta、Ti、Zr、V、Fe 等微量元素含量的变化很大程度上记录和反映了金红石形成的地质条件和源岩性质,它们的相对比例可以判别碎屑金红石的来源。此外,金红石中的锆元素含量与其形成温度具有较强的相关性,因此金红石锆石温度计可以计算其形成温度,增加对变质演化过程中的认识 (Zack et al., 2004b; Waston et al., 2006; Ferry and Waston, 2007; Zheng Yongfei et al., 2011)。金红石的微量元素与其源岩性质有关 (Zack et al., 2002),金红石的 Cr 和 Nb 含量可以用来区分源岩是铁镁质变质岩还是泥质变质岩

(Zack et al., 2002, 2004a; Triebold et al., 2007; Meinhold et al., 2008; Meinhold, 2010)。

矿物鉴定结果显示,柳嘉剖面金红石颗粒以次圆—圆粒状占优,楚雄盆地宜就剖面则以次棱角—次圆粒状占优。金红石地球化学测试在爱尔兰圣三一学院完成。将测试结果参照金红石 Cr—Nb 判别图(Meinhold et al., 2008)进行源岩判别,其中 Zr 含量温度公式参照 Watson 等(2006)。从金红石母岩类型 Cr—Nb 判别图看(图 5):①总体上,柳嘉剖面和宜就剖面金红石母岩均主要为变泥质岩,占比均超过 70%,且最大值均出现在古近纪晚期。②柳嘉剖面,样品 S040102、S110105 和 S110102 变泥质岩占比相近,S110101 增加了 6%左右,即显著变化发生在古近纪早期和晚期之间。宜就剖面,C123101、C123108 变泥质岩占比相近,C010109 下降 4%左右,C010104 较前者又增加 6%左右,即显著变化发

生在白垩纪与古近纪之间。③晚白垩世,两剖面的变泥质岩的比例相似;古近纪,柳嘉剖面变泥质岩占比要高于宜就剖面(3%~4%)。

3.2 金红石 Zr 温度计

由于金红石 Zr 元素含量与金红石形成温度有良好的线性关系,因此金红石 Zr 温度计(Zack et al., 2004b; Watson et al., 2006; Tomkins et al., 2007; Ferry and Watson, 2007)自问世以来得到广泛研究和应用。本文温度计算采用 Watson 等(2006)给出的公式: $T(^{\circ}\text{C}) = 4470/[7.36 - \log(\text{Zr}(\mu\text{g/g}))] - 273$ 。该公式假定压力为 1.0 GPa,并基于实际样品进行校正。对于金红石 Zr 温度计所代表的地质意义已有综述进行了较详细的归纳(高晓英等, 2011)。本文依据相关文献(Zack et al., 2004b)中变质相的温度划分标准(低于 500℃ 为绿片岩/蓝片岩相变质岩,500~750℃ 为角闪岩/榴辉

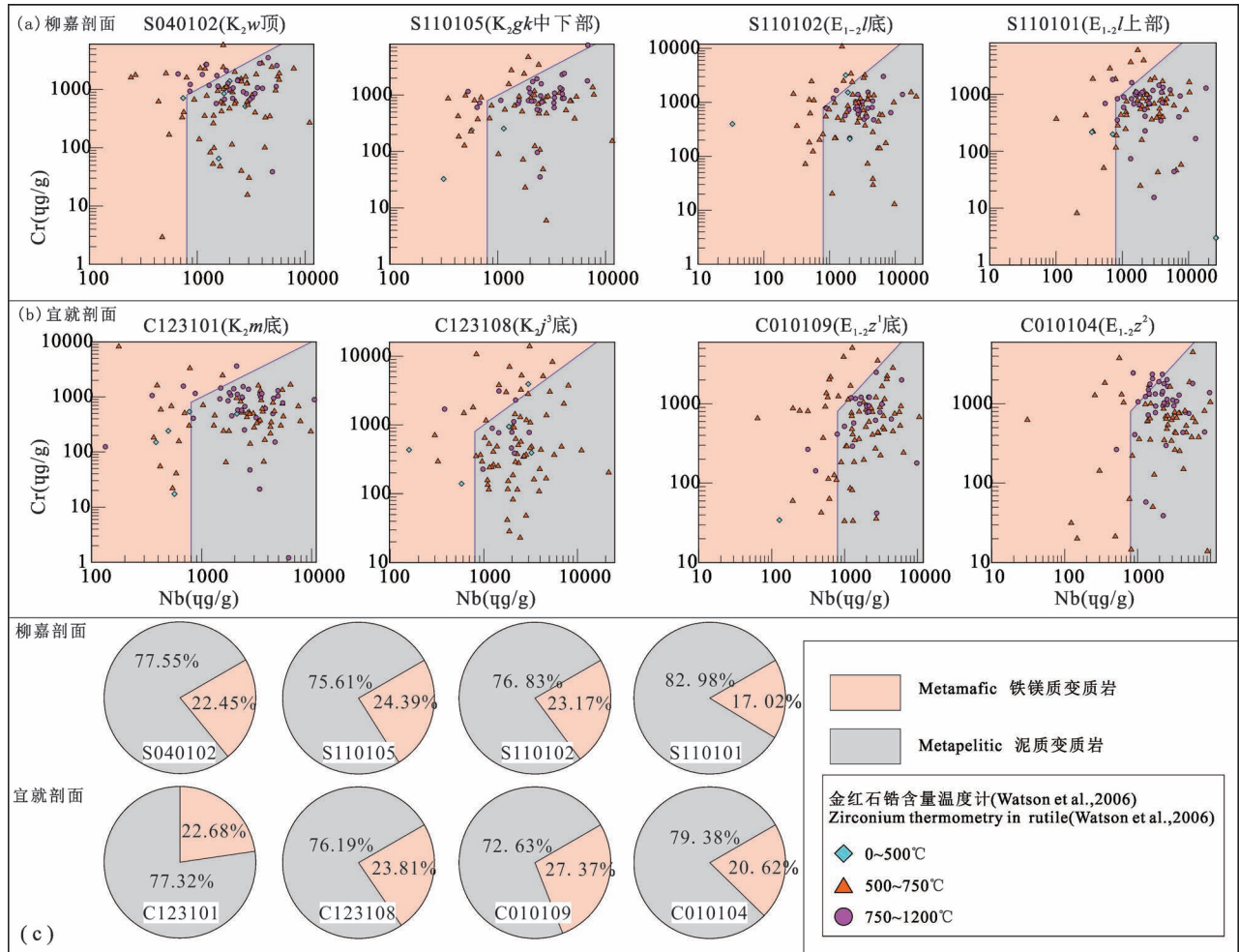


图 5 上扬子盆地西缘柳嘉剖面和宜就剖面金红石母岩类型 Cr—Nb 分类图解

Fig. 5 Cr versus Nb discrimination diagram for rutile from different metamorphic lithologies in Liujia section and Yijiu section in the western margin of Upper Yangtze Basin

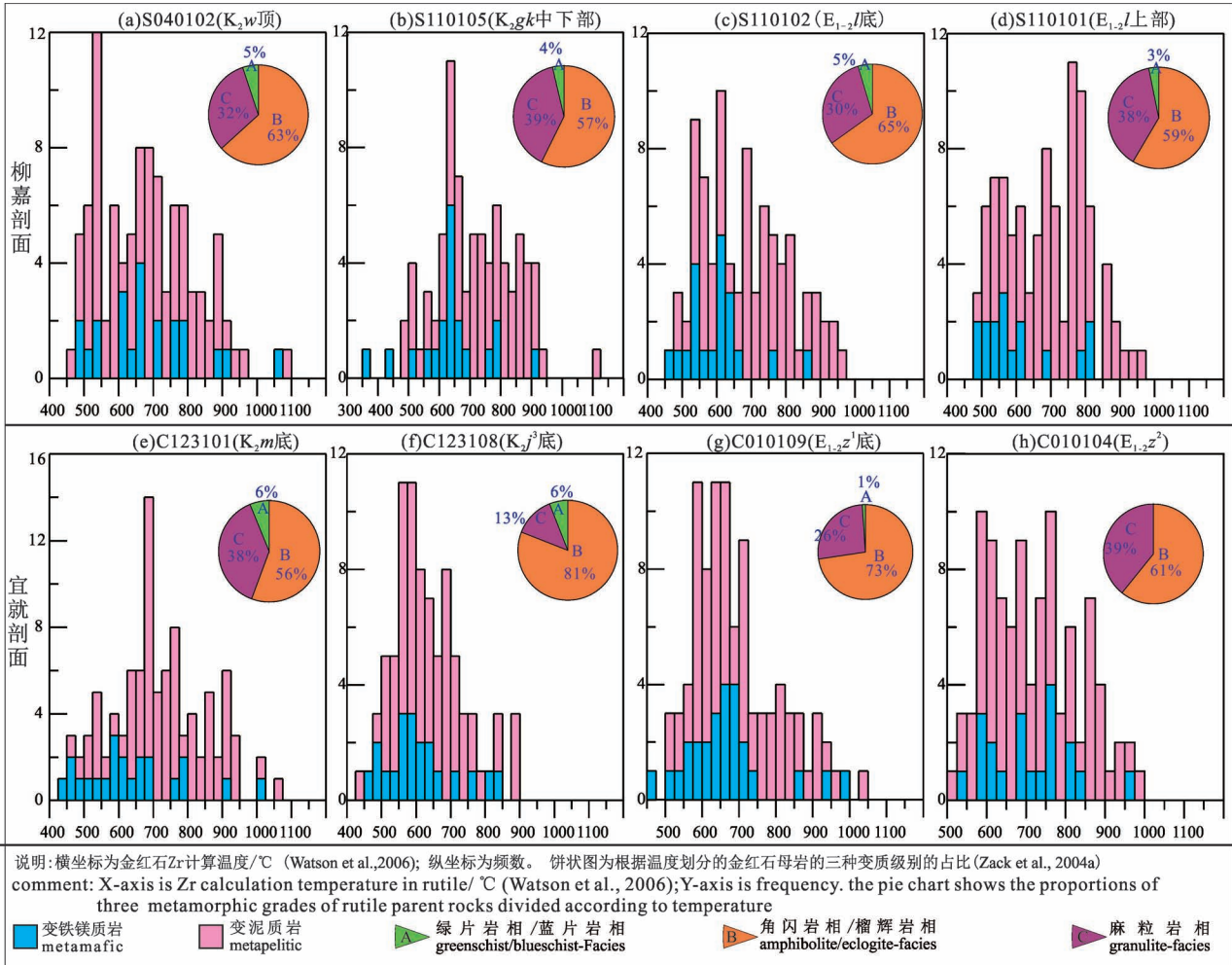


图 6 上扬子盆地西缘柳嘉剖面 and 宜就剖面碎屑金红石形成温度分布直方图和变质岩相饼图
(变质相分类参考 Zack et al., 2004a; 温度计算公式参考 Watson et al., 2006)

Fig. 6 Histograms of forming temperatures and Metamorphic facies pie charts for detrital rutile in Liujia section and Yijiu section in the western margin of Upper Yangtze Basin (Classification of metamorphic facies reference Zack et al., 2004a; Temperature calculation formula references Watson et al., 2006)

岩相中级变质岩,高于 750℃ 为麻粒岩相变质岩)对所有样品进行了初步分类。金红石形成温度分布直方图和变质相占比饼图(图 6)揭示,所有样品中低于 500℃ 的占极少数,500~750℃ 温度区间最多,因此变质岩以角闪岩/榴辉岩相为主,其次是麻粒岩相,多数在约 30%~40%,而绿片岩/蓝片岩相的变质岩占比基本不超过 10%,反映源岩中的变质岩以角闪岩/榴辉岩为主、麻粒岩相为辅的特征。

基于金红石的母岩变质相划分分析,柳嘉剖面和宜就剖面各自存在一些特点。①柳嘉剖面(图 6)晚白垩世—古近纪,绿片/蓝片岩相变化不大(3%~5%),其变化主要表现为角闪岩/榴辉岩相和麻粒岩相之间的此消彼长。麻粒岩相呈现晚白垩世晚期增

加、古近纪柳嘉组沉积早期减少、柳嘉组沉积末期增加的特点,相差高达 8% 左右。值得注意的是,这一变化特点与重矿物变质岩指数 GZi 的变化趋势有很好的 consistency,共同揭示出源区的高级变质岩在晚白垩世晚期增加、古近纪早期减少的变化规律。②宜就剖面(图 6),晚白垩世早期到晚期(C123101 相比 C123108)麻粒岩相由 38% 减少到 13%。古近纪相比晚白垩世(C010109 相比 C123108),麻粒岩相在不断增加,其余岩则相应减少,因此宜就剖面麻粒岩相呈现晚白垩世晚期减少、古近纪持续增加的变化规律。③晚白垩世晚期,柳嘉剖面和宜就剖面麻粒岩相呈现相反的变化趋势,柳嘉剖面的增加趋势与宜就剖面的减少趋势形成鲜明反差(图 6),揭示

出二者当时的物源存在明显差异。

综上,砂岩的金红石地球化学对比揭示出柳嘉剖面与宜就剖面最显著差异在晚白垩世晚期(K_2gk 或 K_2j^3),表明当时的“西昌盆地”和“四川盆地”的物源存在一定的差异。

4 讨论

宜就剖面晚白垩世砂岩重矿物中缺乏变质矿物石榴子石、具极低的 GZi 指数。由于在西昌、会理等地区采集的晚白垩世砂岩样品中也缺乏变质矿物石榴子石,因此晚白垩世西昌和楚雄地区在物源上可能具有相似性,而与川南宜宾地区不同。攀枝花、西昌等地采集的新近系昔格达组砂岩的重矿物中出现一定含量的石榴子石、绿帘石等变质矿物,现今的金沙江攀枝花段河道砂中均含一定量的石榴子石、角闪石、绿帘石等变质矿物(王中波等,2006),新近纪砂岩与现今河道砂的指示性重矿物存在较好的相似性,明显不同于晚白垩世—古近纪砂岩,据此推测西昌地区新近纪以来和古近纪以前的物源差异较大。

上扬子西缘白垩系碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱具相似性(Carter et al., 2003; Wang Licheng et al., 2014;王延路, 2017;姜磊等,2018),揭示出白垩纪上扬子盆地西缘(现今的四川盆地、楚雄盆地、兰坪—思茅盆地、勐赛盆地、呵叻盆地)具有相似的物源,并普遍受到松潘—甘孜再旋回沉积岩的影响;白垩系碎屑岩主微量元素分析研究(李志明等,2003;杨国臣等,2010;李明欣等,2013;石海岩等,2014;沈立建等,2015)揭示出白垩纪上扬子盆地西缘物源主要为中酸性岩浆岩或者中酸性岩浆岩和再旋回沉积岩,松潘甘孜褶皱带和龙门山构造带是主要的物源区。已有研究发现思茅盆地晚白垩世勐野井组沉积期长英质岩源区构造活动加强、隆升剥蚀加速(苗卫良等,2015;石海岩等,2016)。本文基于重矿物分析和金红石地球化学分析,对上扬子盆地西缘白垩纪中酸性岩的源区的研究结果与前人的认识一致。此外,本文还揭示上扬子源区的晚白垩世晚期隆升剥蚀加速事件。综合以上资料及古地理格局研究(郭正吾等,1996;Carter et al., 2003;Wang Licheng et al., 2014)等资料推断,上扬子盆地西缘在晚白垩世晚期出现的物源变化应是青藏高原东缘快速隆升剥蚀的沉积响应。

据四川省地质矿产局(1991),青藏高原东缘尤其松潘—甘孜褶皱带内发育大量新元古代—白垩纪花岗岩及基性岩体,上扬子盆地西缘岩浆岩物源在

晚白垩世显著增加是松潘—甘孜褶皱带侵入岩体遭受大量剥蚀的结果,隆升剥蚀高峰期大致出现在晚白垩世晚期。龙门山构造带内的后山变质带是上扬子西部重要的中高级变质岩出露区域,松潘—甘孜变质带的三叠系变质地层的变质强度普遍不超过低绿片岩相,显然柳嘉剖面的变质岩源区的变化更倾向于是在龙门山后山变质带剥蚀加剧的结果,因此川南地区岩浆岩和变质岩物源在晚白垩世晚期普遍增加是松潘甘孜褶皱带和龙门山构造带加速隆升剥蚀的共同结果。西昌—楚雄地区晚白垩世变质岩物源匮乏,这可能意味着古近纪以前,西昌—楚雄盆地西侧现今出露的变质基底岩系当时尚未大面积剥露。

综上所述,晚白垩世晚期“青藏高原”东缘的快速隆升为上扬子盆地西缘普遍提供了大量的岩浆岩物源,为川南地区提供了变质岩物源。松潘—甘孜地块和龙门山构造带在晚白垩世晚期进入快速隆升的建造期,当时的“青藏高原”可能已经发展为具有一定规模的高原(Peter et al., 2013;许志琴等,2016),而“高原造山”与上扬子局部地区出现沙漠沉积的耦合关系仍待进一步的研究。

5 结论

(1)晚白垩世—古近纪,川南柳嘉剖面砂岩重矿物组合为钛铁矿—赤褐铁矿—锆石—石榴子石,楚雄宜就剖面砂岩重矿物组合为赤褐铁矿—钛铁矿—锆石,变质矿物石榴子石是二者最主要的差异。晚白垩世晚期,宜就剖面 ATi 指数、柳嘉剖面的 ATi 指数和 GZi 指数均大幅增加,这是物源变化的一种表现。

(2)晚白垩世—古近纪,柳嘉剖面和宜就剖面的金红石源岩相似,主要为泥质变质岩,以角闪岩/榴辉岩相中级变质为主。晚白垩世晚期二者的麻粒岩相变质岩变化趋势不同;柳嘉剖面表现为先增后减,晚白垩世晚期最大,达 39%;宜就剖面呈先减后增,晚白垩世晚期出现最小值,为 13%;这是物源差异的一种表现。

(3)晚白垩世晚期出现的重矿物指数变化和金红石地球化学的差异是上扬子盆地源区变化的响应,结合古水流及前人资料推断,松潘—甘孜褶皱带和龙门山构造带在晚白垩世晚期发生了快速隆升剥蚀。

致谢:感谢圣三一学院 David Chew 和 Daniel Döpke 等在样品测试工作中提供的帮助和支持。感谢诸位审稿人对本文不足之处提出的修改意见和建

议。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈斌, 李勇, 王伟明, 李海兵, 苏德辰, 颜照坤. 2016. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组物源及构造背景分析. 地质学报, 90(5): 857~872.

邓飞, 贾东, 罗良, 李海滨, 李一泉, 武龙. 2008. 晚三叠世松潘甘孜和川西前陆盆地的物源对比: 构造演化和古地理变迁的线索. 地质论评, 54(4): 561~573.

邓康龄. 2007. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序. 石油与天然气地质, 28(4): 485~490.

高晓英, 郑永飞. 2011. 金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度计. 岩石学报, 27(2): 417~432.

辜学达, 刘啸虎. 1997. 四川省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~417.

郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 刘应楷, 殷建棠, 王庆国, 梁恩宇, 李国建, 陈昭国, 刘宗正, 吴春生, 赵泽江. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社: 1~200.

姜磊, 邓宾, 刘树根, 王自剑, 周政, 罗强, 何宇, 赖东. 2018. 上扬子盆地新生代差异抬升剥蚀与分异过程. 地球科学, 43(6): 1872~1886.

李明欣, 梁斌, 王全伟, 朱兵, 郝雪峰, 应立朝, 刘亮, 付小方. 2013. 川西龙泉山白垩系泥质岩的元素地球化学特征. 高校地质学报, 19(2): 346~354.

李勇, 贺佩, 颜照坤, 董顺利, 陶晓凤. 2010. 晚三叠世龙门山前陆盆地地动力学分析. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(4): 401~411.

李玉文, 陈乐尧, 江新胜. 1988. 川南黔北白垩—第三纪沙漠相及其意义. 岩相古地理, 38(6): 1~14.

李志明, 刘家军, 胡瑞忠, 刘玉平, 李朝阳, 何明勤. 2003. 兰坪中新生代盆地沉积岩源区构造背景和物源属性研究——砂岩地球化学证据. 沉积学报, 21(4): 547~552.

李智武, 陈洪德, 刘树根, 侯明才, 邓宾. 2010. 龙门山冲断隆升及其走向差异的裂变径迹证据. 地质科学, 45(4): 944~968.

刘树根, 邓宾, 孙玮, 钟勇, 李智武, 李金玺, 姜磊. 2018. 四川盆地: 周缘活动主控下形成的叠合盆地. 地质科学, 53(1): 308~326.

苗卫良, 马海州, 张西营, 石海岩, 李永寿, 容志明. 2015. 云南思茅盆地勐野井组碎屑岩矿物学、地球化学特征及古盐湖沉积环境演化. 地质学报, 89(11): 2096~2107.

潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 36(1): 1~28.

沈立建, 刘成林, 王立成. 2015. 云南兰坪盆地云龙组上段稀土、微量元素地球化学特征及其环境意义. 地质学报, 89(11): 2036~2045.

施振生, 杨威, 谢增业, 金惠, 谢武仁. 2010. 四川盆地晚三叠世碎屑组分对源区分析及印支运动的指示. 地质学报, 84(3): 387~397.

石海岩, 马海州, 苗卫良, 李永寿, 张西营. 2014. 云南思茅盆地江城上白垩统勐野井组稀土微量元素特征及地质意义. 地球化学, 43(4): 415~427.

石海岩, 苗卫良, 马海州, 李永寿, 张西营, 严玲琴, 马维明, 王振东. 2016. 云南思茅盆地白垩纪—古新世碎屑岩地球化学特征及地质意义. 现代地质, 30(3): 541~554.

四川盆地陆相中生代地层古生物编写组. 1982. 四川盆地陆相中生代地层古生物. 成都: 四川人民出版社: 1~215.

四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社: 1~680.

江新胜, 潘忠习, 傅清平. 1999. 四川盆地白垩纪沙漠风向变化规律及其意义. 岩相古地理, 19(1): 3~13.

江新胜, 徐金沙, 潘忠习. 2003. 四川盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征. 沉积与特提斯地质, 23(1): 60~68.

汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 2000. 物源分析的研究与展望. 沉积与特提斯地质, 20(4): 104~110.

王二七, 尹纪云. 2009. 川西南新生代构造作用以及四川原型盆地的破坏. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 359~367.

王延路. 2017. 老挝北部勐赛盆地白垩纪中期地层物源分析及其构造环境意义. 导师: 魏玉帅和王立成. 中国地质大学(北京).

王中波, 杨守业, 李萍, 李从先, 蔡进功. 2006. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义. 沉积学报, 24(4): 570~578.

徐亚军, 杜远生, 杨江海. 2007. 沉积物物源分析研究进展. 地质科技情报, 26(3): 26~32.

许效松, 刘宝珺, 徐强, 潘桂棠, 颜仰基. 1997. 中国西部大型盆地分析及地球动力学. 北京: 地质出版社: 1~168.

许志琴, 赵中宝, 彭森, 马绪宣, 李化启, 赵俊猛. 2016. 论“造山的高原”. 岩石学报, 32(12): 3557~3571.

杨国臣, 于炳松, 陈建强, 姚纪明, 李善营. 2010. 川西前陆盆地上侏罗统一白垩系泥质岩稀土元素地球化学. 现代地质, 24(1): 140~150.

赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 21(3): 409~415.

郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 翟文亮, 高红灿, 耿威. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征. 地质论评, 55(4): 484~495.

周名魁, 刘伊然. 1988. 西昌—滇中地区地质构造特征及地史演化. 重庆: 重庆出版社: 1~156.

Carroll A R, Graham S A, Smith M F. 2010. Walled sedimentary basins of China. Basin Research, 22: 17~32.

Carter A, Bristow C S. 2003. Linking hinterland evolution and continental basin sedimentation by using detrital zircon thermochronology: a study of the Khorat Plateau Basin, eastern Thailand. Basin Research, 15(2): 271~285.

Chen Bin, Li Yong, Wang Wei Ming, Li Hai Bing, Su De Chen, Yan Zhao Kun. 2016&. The provenance and tectonic setting of Late Triassic Xujiahe Formation in the Longmenshan foreland basin, SW China. Acta Geologica Sinica, 90(5): 857~872.

Deng Bin, Liu Shugen, Li Zhiwu, Cao Junxing, Sun Wei. 2012. Late Cretaceous tectonic change of the eastern margin of the Tibetan plateau——results from multisystem thermochronology. Journal of the Geological Society of India, 80(2): 241~254.

Deng Fei, Jia Dong, Luo Liang, Li Haibin, Li Yiquan, Wu Long. 2008&. The contrast between provenances of Songpan—Garze and Western Sichuan foreland basin in the Late Triassic. Geological Review, 54(4): 561~571.

Deng Kangling. 2007&. Indosinian progressive deformation and its chronogenesis in Longmengshan structural belt. Oil & Gas Geology, 28(4): 485~490.

Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. Contributions to Mineralogy & Petrology, 154(4): 429~437.

Force E R. 1980. The provenance of rutile. Journal of Sedimentary Petrology, 50(2): 485~488.

- Frost B R, 1991. Stability of oxide minerals in metamorphic rocks. *Reviews in Mineralogy*, 25: 469~488.
- Gao Xiaoying, Zheng Yongfei. 2011&. On the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon geothermometers. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 417~432.
- Geng Xueda, Liu Xiaohu. 1997#. *Rock Formations in Sichuan Province*. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1~417.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, Liu Yingkai, Yin Jiantang, Wang Qingguo, Liang Enyu, Li Guojian, Chen Zhaoquo, Liu Zongzheng, Wu Chunsheng, Zhao Zejiang. 1996 #. *The Formation of Sichuan Basin and Its Development*. Beijing: Geological Publishing House: 1~200.
- Jiang Lei, Deng Bin, Liu Shugen, Wang Zijian, Zhou Zheng, Luo Qiang, He Yu, Lai Dong. 2018&. Differential uplift and fragmentation of Upper Yangtze basin in Cenozoic. *Earth Science*, 43(6): 1872~1886.
- Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Fu Qingping. 1999&. The variations of palaeo wind direction of the cretaceous desert in the Sichuan Basin and their significance. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(1): 3~13.
- Jiang Xinsheng, Xu Jinsha, Pan Zhongxi. 2003&. The surface features of the quartz sand grains from the Cretaceous desert in the Sichuan Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(1): 60~68.
- Li Mingxin, Liang Bin, Wang Quanwei, Zhu Bing, Hao Xuefeng, Ying Lichao, Liu Liang, Fu Xiaofang. 2013&. Geochemistry of Cretaceous argillaceous rocks in Longquan Mountain, Western Sichuan. *Geological Journal of China Universities*, 19(2): 346~354.
- Li Yong, He Pei, Yan Zhaokun, Dong Shunli, Tao Xiaofeng. 2010&. Dynamics of Late Triassic Longmenshan foreland basin, China. *Journal of Chengdu University of technology(Science & Technology Edition)*, 37(4): 401~411.
- Li Yuwen, Chen Leyao, Jiang Xinsheng. 1988&. Cretaceous—Tertiary desert facies and its significance in southern sichuan and northern guizhou. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 38(6): 1~14.
- Li Zhiming, Liu Jiajun, Hu Ruizhong, Liu Yuping, Li Chaoyang, He Mingqin. 2003&. Tectonic setting and provenance of source rock for sedimentary rocks in Lanping Mesozoic—Cenozoic basin: evidences from geochemistry of sandstones. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(4): 547~552.
- Li Zhiwu, Chen Hongde, Liu Shugen, Hou Mingcai, Deng Bin. 2010&. Differential uplift driven by thrusting and its lateral variation along the Longmenshan belt, western Sichuan, China: evidence from fission track thermochronology. *Chinese Journal of Geology*, 45(4): 944~968.
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Chen Hongde, Deng Bin, Hou Mingcai, Wu Wenhui, Cao Junxing. 2012. Spatial variation in Meso—Cenozoic exhumation history of the Longmen Shan thrust belt (eastern Tibetan Plateau) and the adjacent western Sichuan basin: constraints from fission track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47(1): 185~203.
- Liu Shugen, Deng Bin, Sun Wei, Zhong Yong, Li Zhiwu, Li Jinxi, Jiang Lei. 2018. Sichuan Basin: A superimposed sedimentary basin mainly controlled by its peripheric tectonics. *Chinese Journal of Geology*, 53(1): 308~326.
- Meinhold G, Frei D. 2008. Detrital zircon ages from the islands of Inousses and Psara, Aegean Sea, Greece: Constraints on depositional age and provenance. *Geological Magazine*, 145(6): 886~891.
- Meinhold G. 2010. Rutile and its applications in earth sciences. *Earth Science Reviews*, 102(1): 1~28.
- Miao Weiliang, Ma Haizhou, Zhang Xiyiing, Shi Haiyan, Li Yongshou, Rong Zhiming. 2015&. Mineralogical and geochemical characteristics of detrital rocks in the Mengyejing Formation and evolution of the sedimentary environment of paleolake in Simao Basin, Yunnan Province. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2096~2107.
- Morton A C, Hallsworth C R. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124(1~4): 3~29.
- Morton A C, Hallsworth C R. 1994. Identifying provenance——specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90(3~4), 241~256.
- Morton A C, Hurst A. 1995. Correlation of sandstones using heavy minerals: an example from the Stafford Formation of the Snorre Field, northern North Sea. *Geological Society London Special Publications*, 89(1): 3~22.
- Morton A C, Todd S P, Haughton P D W. 1991. Developments in sedimentary provenance studies. *Geological Society*.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xiong Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009&. Subdivision of tectonic units in China. *Geology in China*, 36(1): 1~28.
- Peter J J KAMP, Liu Shugen, Xu Ganqing, Li Zhiwu, Martin. Danisik and Deng Bin. 2013. Cooling history of a crustal section in eastern Tibet (well HC1) constrained by thermochronology. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(supp.): 57~58.
- Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. 1965. *Geology of sand and sandstone*. Indiana Geological Survey.
- Roger F, Calassou S, Lancelot J, Malavieille Mattauer M, Xu Z Q, Hao Z W, Hou L W. 1995. Miocene emplacement and deformation of the Konga Shan granite (Xianshuihe fault zone, west Sichuan, China): geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 130: 201~216.
- Shen Lijian, Liu Chenglin, Wang Licheng. 2015&. Geochemical characteristics of rare earths and trace elements of the upper Yunlong Formation in Lanping Basin, Yunnan and its environments significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2036~2045.
- Shi Haiyan, Ma Haizhou, Miao Weiliang, Li Yongshou, Zhang Xiyiing. 2014&. Characteristics and geological significances of rare earth and trace elements from Upper Cretaceous Mengyejing Formation of Simao Basin in Jiangcheng County, Yunnan Province. *Geochimica*, 43(4): 415~427.
- Shi Haiyan, Miao Weiliang, Ma Haizhou, Li Yongshou, Zhang Xiyiing, Yan Lingqin, Ma Weiming, Wa Zhendong. 2016&. Geochemistry of Cretaceous— Palaeocene detrital rocks in Simao Basin, Yunnan Province and its geological significances. *Geoscience*, 30(03): 541~554.
- Shi Zhensheng, Yang Wei, Xie Zengye, Jin Hui, Xie Wuren. 2010. Upper Triassic clastic composition in Sichuan Basin. Southwest China: implication for provenance analysis and the Indosinian orogeny. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 387~397.
- Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991#. *Regional Geology of Sichuan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1~680.
- The Writing group of Continental Mesozoic Stratigraphy and Paleontology in Sichuan Basin of China. 1982#. *Continental Mesozoic Stratigraphy*

- and Paleontology in Sichuan Basin of China. Chengdu: People's Publishing House of Sichuan, 1~215.
- Tomkins H S, Powell R, Ellis D J. 2007. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 703~713.
- Triebold S, Eynatten H V, Luvizotto G L, Zack T. 2007. Deducing source rock lithology from detrital rutile geochemistry: an example from the Erzgebirge, Germany. *Chemical Geology*, 244(3): 421~436.
- Von E H, Gaupp R. 1999. Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. *Sedimentary Geology*, 124(1): 81~111.
- Wang E, Burchfiel B C. 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau. *GSA Bulletin*, 112(3): 413~423.
- Wang Erqi, Yin Jiyun. 2009. Cenozoic multi-stage deformation occurred in southwest Sichuan: Cause for the dismemberment of the proto-Sichuan basin. *Journal of Northwest University (natural Science Edition)*, 39(3): 359~367.
- Wang Lichen, Liu Chenglin, Gao Xiang, Zhang Hua. 2014a. Provenance and paleogeography of the Late Cretaceous Mengyejing Formation, Simao Basin, southeastern Tibetan Plateau: Whole-rock geochemistry, U-Pb geochronology, and Hf isotopic constraints. *Sedimentary Geology*, 304(S1): 44~58.
- Wang Licheng, Liu Chenglin, Gao Xiang, Zhang Hua. 2014b. Provenance and paleogeography of the Late Cretaceous Mengyejing Formation, Simao Basin, Southeastern Tibetan Plateau. *Sedimentary Geology*, 304(S1): 255~256.
- Wang Yanlu. 2017. Provenance and paleogeography of the Cretaceous strata in the Muang Xai Basin, northern Laos: Petrology, Whole-rock geochemistry, and U-Pb geochronology constraints. Master's Supervisor: Wei Yushuai and Wang Licheng. China University of Geosciences (Beijing).
- Wang Zhengjiang, Chen Hongde, Zhang Jinquan. 2000. Approaches and prospects of provenance. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(4): 104~110.
- Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Ping, Li Chongxian, Cai Jingong. 2006. Detrital mineral compositions of the Changjiang river sediments and their tracing implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570~578.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 151(4): 413.
- Xu Xiaosong, Liu Baojun, Xu Qiang, Pan Guitang, Yan Yangji. 1997. Analyses of Large-scale Basins in West China and Their Geodynamic Characteristics. Beijing: Geological press: 1~168.
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. 2007. Prospects of sediment provenance analysis. *Geological Science and Technology Information*, 26(3): 26~32.
- Xu Zhiqin, Zhao Zhongbao, Peng Miao, Ma Xuxuan, Li Huaqi, Zhao Junmeng. 2016. Review of "orogenic plateau". *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3557~3571.
- Yang Guochen, Yu Bingsong, Chen Jianquo, Yao Jiming, Li Shanying. 2010. Geochemical research on rare earth elements of argillaceous rocks of Upper-Jurassic and Cretaceous in the western Sichuan foreland Basin. *Geoscience*, 24(1): 140~150.
- Zack T, Eynatten H V, Kronz A. 2004a. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sedimentary Geology*, 171(1): 37~58.
- Zack T, Kronz A, Foley S F, Rivers T. 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184(1): 97~122.
- Zack T, Moraes R, Kronz A. 2004b. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 148(4): 471~488.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 409~415.
- Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, Zhai Wenliang, Gao Hongcan, Geng Wei. 2009. Sequence based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin. *Geological Review*, 55(4): 484~495.
- Zheng Yongfei, Gao Xiaoyu, Chen Renxu, Gao Tianshan. 2011. Zr-in-rutile thermometry of eclogite in the Dabie orogen: Constraints on rutile growth during continental subduction-zone metamorphism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2): 427~451.
- Zhou Mingkui, Liu Yiran. 1988. Characteristics of Geological Structure and Evolution of Geological History in Central Yunnan. Chongqing: Chongqing Publishing House: 1~156.

Provenance change and its indication of Late Cretaceous in the west margin of Upper Yangtze Basin

JIANG Lei, LIU Shugen, WANG Zijian, LI Zhiwu,

LAI Dong, HE Yu, LUO Qiang, ZHOU Zheng, DENG Bin

State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059

Objectives: The Upper Cretaceous—Paleogene sections of Liujia area in the south of Sichuan Basin and of Yijiu area in the north of Chuxiong Basin have been studied, which purpose is to further understand the provenance change and tectonic activities in the western margin of the Upper Yangtze basin.

Methods: We carried out some researches of the Upper Cretaceous—Paleogene sections by sedimentary

structure, traditional heavy mineral analysis, and the geochemistry of rutile trace elements in the western margin of the Upper Yangtze basin.

Results: The results show that:①In late Late Cretaceous, the medium—acid magmatic rock index (ATi) and the low—middle grade metamorphic rock index (GZi) increased in Liujia section, and the medium—acid magmatic rock index (ATi) increased in Yijiu section. Liujia section is rich in garnet mineral, which is the key difference from Yijiu section. ②The types of rutile mother rocks in Liujia section and Yijiu section are mainly argillaceous metamorphic rocks, with amphibolite facies and eclogite facies as the main types. In the late Late Cretaceous, the granulite facies in Liujia section reached the maximum value of 39%, and the minimum value of granulite facies in Yijiu section reached 13%. The variation trend of granulite facies in the west margin of the Upper Yangtze basin is a manifestation of the provenance difference.

Conclusions: The Late Cretaceous provenance changes in the western margin of the upper Yangtze basin revealed that a large-scale rapid uplift and denudation events occurred in the Songpan—Ganzi Fold Belt and Longmenshan Structural Belt in the late Late Cretaceous.

Keywords: Upper Yangtze, heavy mineral, Cretaceous, provenance, rutile

Acknowledgements: I would like to thank David Chew and Daniel Döpke of Trinity College for their help and support in the sample testing work. Thanks to the anonymous reviewers for their suggestions and suggestions for the inadequacies of this article

First Author: JIANG Lei, male, born in 1981, doctoral candidate, majoring in shale gas geology and structural geology, Email:47047999@qq.com

Corresponding Author: DENG Bin, male, born in 1980, doctor, a professor of Chengdu University of Technology, mainly engaged in the teaching and research of oil—gas basin analysis, Email: dengbin13@mail.cdut.edu.cn

Manuscript received on: 2018-05-13; Accepted on: 2019-02-20; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.02.017