

四川盆地西缘晚新生代大邑砾岩的物源及其成因： 来自重矿物和孢粉的证据^{*}

郑勇^{1,2} 孔屏^{1**}

ZHENG Yong^{1,2} and KONG Ping^{1**}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院地球深部重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院大学,北京 100049

1. Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2012-03-04 收稿, 2013-04-04 改回.

Zheng Y and Kong P. 2013. Provenance and origin of the Late Cenozoic Dayi conglomerates in the western margin of the Sichuan Basin: New insights from heavy mineral and spore-pollen assemblages. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8):2949–2958

Abstract The collision between Indian and Eurasian plates initiated in the Early Cenozoic produced the high Tibetan Plateau. Accompanied with the uplift of the Tibetan Plateau Tertiary sediments are almost absent in the adjacent Sichuan Basin, and the preserved oldest deposits are the Late Cenozoic Dayi conglomerates. Therefore, Dayi conglomerates can potentially provide information on palaeoenvironments and tectonic evolution of the Tibetan Plateau and adjacent areas. This paper reports heavy mineral compositions and spore-pollen assemblage within three Dayi conglomerates and a modern sand sample from the bank of the Min River and attempts to understand the origin of Dayi conglomerates through provenance analysis and sedimentation environment studies. Dayi conglomerates contain a variety of heavy minerals, which suggests that the provenance of the Dayi conglomerates covers a wide range of petrologic types. Except for extremely unstable minerals, the similarity in heavy mineral compositions between a newly exposed Dayi conglomerate and the modern sand from the Min River suggests that the Dayi conglomerates were delivered to the Sichuan Basin by the Min River, and during which time the Min River already dissected the Longmen Shan and was sourced to Songpan-Ganzi flysch belt. Garnet rarely occurs in natural profiles of Dayi conglomerates and we attribute this to intense weathering in an acidic environment. Spore-pollen is very scarce in the Dayi conglomerates with a concentration of 0.2 grains/g. Species are mostly derived from alpine coniferous forest and a few from deciduous broad-leaf and herbaceous plants. Such an assemblage reflects cold environment. Together with available chronological data for the Dayi conglomerates, we prefer that the Dayi conglomerates are glaciofluvial deposits formed ~2.0Ma ago. Formation of Dayi conglomerates reflects Early Quaternary cold environment in the eastern margin of the Tibetan Plateau.

Key words Dayi conglomerates; Heavy mineral assemblage; Spore-pollen assemblage; Glaciofluvial deposits; The Min River; Tibetan Plateau

摘要 新生代早期印度与欧亚板块的俯冲碰撞造就了巍峨高耸的青藏高原。然而,在其相邻的四川盆地,伴随青藏高原强烈隆升所堆积的碎屑沉积物,最老仅能追索到晚新生代的大邑砾岩。因此,解读广泛发育于四川盆地西缘的大邑砾岩成因对获取青藏高原及其周缘古环境信息及理解相关的构造演化过程具有重要意义。本文报告了对三个典型大邑砾岩剖面样品的重矿物和孢粉组合研究结果,试图从大邑砾岩的物源区和沉积环境来解读大邑砾岩的成因。大邑砾岩中重矿物种类繁多,表明相应物源区具有多种岩石类型。除极不稳定矿物外,大邑砾岩新鲜剖面样品的重矿物组合与现代岷江沉积物极其相似,表明大邑砾岩是经由岷江通道输送到四川盆地的;富含石榴子石等远源矿物表明当时的古岷江已切穿龙门山,深入到松潘-甘孜

* 本文受中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB03020300)和国家自然科学基金项目(41173067,41021063)联合资助。

第一作者简介:郑勇,男,1984年生,博士生,地球化学专业,E-mail:zhengyong@mail.iggcas.ac.cn

** 通讯作者:孔屏,女,1963年生,博士,研究员,地球化学专业,E-mail:pingkong@mail.iggcas.ac.cn

褶皱带内。孢粉分析显示孢粉含量极低,为0.2粒/克,孢粉类型以高山黯针叶林成分为主,混有少量落叶阔叶林和草本植物花粉,显示了高寒的环境。结合已有的年代学结果,本文认为大邑砾岩是形成于2.0Ma的冰水沉积物,其形成反映了青藏高原第四纪早期的寒冷环境。

关键词 大邑砾岩;重矿物组合;孢粉组合;冰水沉积物;岷江;青藏高原

中图法分类号 P588.21

1 引言

青藏高原晚新生代的构造活动不仅控制了其东缘显著地貌特征的形成(Kirby and Whipple, 2001; Kirby *et al.*, 2003),同时还可能是东亚乃至全球环境变化的主要原因(Raymo *et al.*, 1989; Ruddiman *et al.*, 1989)。有别于青藏高原周缘其他盆地,四川盆地经历了较长时间的新生代沉积间断,晚新生代沉积的大邑砾岩直接覆盖在了白垩纪或侏罗纪的红层之上。因此,对四川盆地西缘晚新生代相关沉积物的研究,不仅可以获取区域古环境的相关信息,还有助于深化对青藏高原周缘构造地貌演化过程的理解。

龙门山中南段以东和新津-成都隐伏断裂以西发育一套砾石沉积。1951年西南地质局石油普查队将该套黄灰、灰黄、浅黄色,中、粗砾砂质卵砾石夹透镜状岩屑砂岩,分选及磨圆较差且缺乏粘土及孢粉化石的地层命名为大邑砾岩(苟宗海和赵兵, 1999),相应典型层型剖面位于岷江西面的大邑氮肥厂附近。大邑砾岩或出露于龙门山中南段边界丘陵地区,或埋藏于成都盆地底部,在平面上彭灌断裂与大邑-广元隐伏断裂之间为大邑砾岩的剥蚀残留区,出露点并不多,仅在灌县玉堂镇汤家沟、崇庆街子场及白塔湖、大邑陈家场白岩沟、团结乡、大邑氮肥厂、邛崃水口场及名山万古乡庙坡等地有大邑砾岩出露(图1),出露厚度介于122~380m之间。其中,熊坡背斜以北的大邑砾岩被认为受控于出口在都江堰南约4km处向南流的古岷江水系;而熊坡背斜以南的大邑砾岩则被认为主要受向东流的古青衣江水系的控制(李勇等, 2006; 黎兵等, 2007; 崔志强等, 2009)。从剖面上看,大邑砾岩与下伏地层多以角度不整合接触,少数呈平行不整合接触关系,界面上存在厚约10cm的“古风化壳”,分布十分稳定,并被钻孔资料所证实(何银武, 1992),表明在大邑砾岩沉积前存在有沉积间断;雅安砾石层以角度不整合上覆于大邑砾岩之上(李勇等, 2002; 王凤林等, 2003)。野外露头及钻孔证实大邑砾岩是四川盆地晚新生代的最新沉积物(李勇等, 2006)。

对于大邑砾岩的沉积特征,已有相关的野外特征描述和沉积学研究(苟宗海等, 2001; 王凤林等, 2003; 李勇等, 2006; 黎兵等, 2007),但是由于砾石岩性复杂,加之后期强烈的湿热风化改造,且缺少相关的古环境资料,对这套砾石的成因认识还存在着较大的分歧。本文试图通过详细的野外考察和室内重矿物及孢粉分析,细化并充实大邑砾岩的沉积特征和沉积环境,从而更好地限定其成因,并对已有的区

内水系演化史进行更为深入的探讨。

2 区域地质背景

青藏高原东缘的龙门山地区是中生代发展的褶皱和俯冲带的一部分,呈北东-南西向展布,大约长500km、宽30~50km(图1)。在区域地质构造上,该区自西向东由松潘-甘孜造山带、龙门山冲断带和四川盆地三个构造单元构成了一个彼此相关的构造系统(李勇等, 2006)。

龙门山冲断带以西的青藏高原东部为松潘-甘孜褶皱带,其主体由三叠系被动陆缘半深海复理石、斜坡相复理石类型的碎屑物质组成。区内大规模的造山作用发生于印支晚期,并同时伴有大规模岩浆活动(许志琴等, 1992; Worley *et al.*, 1996; Worley and Wilson, 1997; Roger *et al.*, 2004; 胡建民等, 2005)。龙门山造山带属青藏高原东缘的陆内造山带,是一个独立的地层复合体。根据地层的构造变形、变位和变质特征,可将其划分为三个构造地层带(李勇等, 1995),由西向东分别为:①变形变质构造地层带,主要由志留系-泥盆系浅变质岩和前寒武系杂岩构成;②变形变位构造地层带,主要由上古生界-三叠系沉积岩构成;③变形构造地层带,主要由侏罗系至第三系红层构成。龙门山造山带东侧的四川盆地是在晚三叠世早期扬子地台西缘被动大陆边缘的基础上形成的,接受多条切穿龙门山造山带并最终汇入盆地内部的江河沉积,如:大渡河、青衣江、岷江及沱江等,充填地层厚度巨大,包括上三叠统至第四系(Li *et al.*, 2003a, b)。尽管如此,除雅安地区有很少的早第三纪沉积外,四川盆地几乎没有接受早新生代的沉积,半固结状的大邑砾岩直接上覆于白垩纪或侏罗纪红层之上。

3 样品采集和鉴定

本研究分析的重矿物样品有4个,其中3个采自大邑砾岩中的砂质透镜体,采样点分别位于玉堂镇(WC09)、大邑镇(WC06)和街子古镇(WC08),几乎涵盖了岷江流域的所有大邑砾岩出露位置(图1)。其中玉堂镇和大邑的样品来自天然剖面(图2a, c),而街子古镇的样品则取自施工工地的新鲜露头(图2b)。为了和现代河流的样品进行对比,又从映秀附近的现代岷江河床上采集了1个沙样(WC30)。对大邑典型露头样品还进行了孢粉分析,用以获取大邑砾岩沉积时的古环境信息。

用于重矿物分析的样品经过烘干后,在清水中浸泡48h,

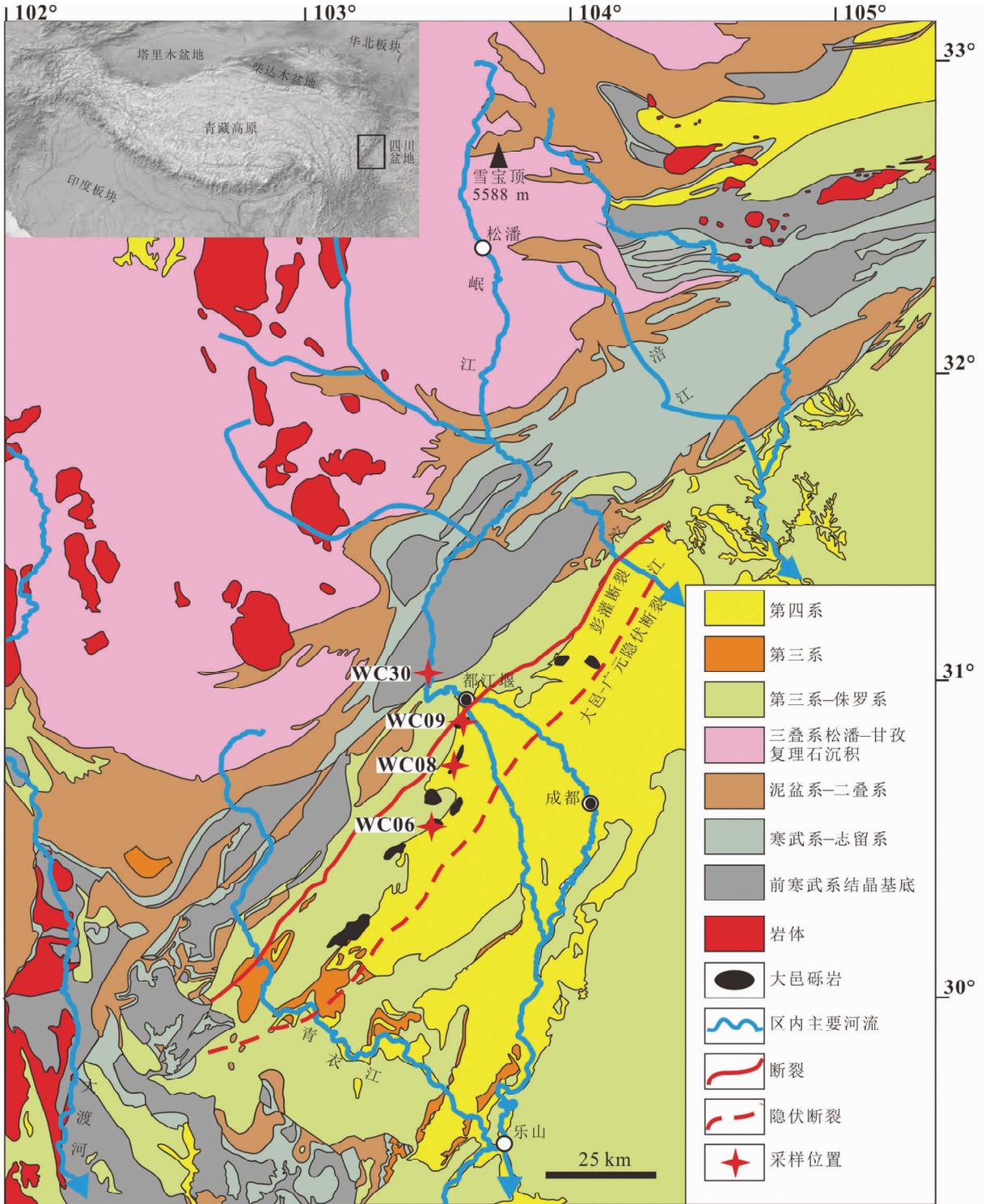


图1 青藏高原东缘地质略图与样品位置

Fig.1 Simplified geologic map of the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau showing the distribution of the Dayi conglomerate and the locations of samples described in Tables 1 and 2

经过套筛,适当加压、水析分离出适当粒级的样品,烘干后用电子天平称重。根据重矿物粒度分布和赋存特点,本次统计的粒度范围为 63 ~ 400 μm 。用三溴甲烷分离出比重大于 2.89g/cm³ 的重矿物部分,分离出来的样品用酒精反复冲洗

后,60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温烘干。采用缩分法随机选取约 20mg 重矿物颗粒并贴在双面胶上,灌上环氧树脂,将表面剖光,黏贴至载玻片上制成光薄片,在偏光显微镜下确认。为了客观的反映样品的组成特征,将光薄片等分为若干个视域,并辅以显微照



图2 大邑砾岩样品采集剖面

(a)-大邑镇大邑砾岩露头;(b)-街子古镇施工地的新鲜剖面;(c)-玉堂镇分选、磨圆较差的大邑砾岩

Fig.2 Study sections of Dayi conglomerates

(a)-Dayi conglomerate outcrop near the Dayi town; (b)-fresh profile of the construction site in the Jiezi Town; (c)-poorly-sorted and sub-angular Dayi conglomerates in the Yutang Town

片记录。参照显微照片,对随机选取的几个视域中的全部重矿物进行鉴定,并取其平均值来减小分析误差。每个重矿物样品随机鉴定颗粒数均在400粒以上(Galehouse, 1971)。

孢粉分析在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成。鉴于以往常规样品用量根本无法获得大邑砾岩孢粉分析结果(周自隆和阮明德, 2006),我们采取10倍于常规用量,约800g左右样品,分三份进行预处理。采用氢氟酸溶矿方法,在每份样品中加入已知粒数的石松孢子(Lycopodium),以便计算孢粉浓度,并用 $10\mu\text{m}$ 筛孔过筛,筛上样品用于鉴定。提取好的样品加入甘油制片在显微镜下鉴定统计,鉴定过程中严格区分地层花粉和现代花粉。

4 分析结果

4.1 重矿物分析

大邑镇样品中70%为不透明矿物,其余样品的不透明矿物含量不超过30%;不透明矿物主要由钛铁矿和磁铁矿组

成,未显示在分析结果之中。现代岷江样品的分析结果与已报道的结果相似(黎兵等, 2007; Yang *et al.*, 2009; 邵磊等, 2010),可用以代表现代岷江源区的重矿物组合特征。辨别出的透明重矿物中,以角闪石及其次生蚀变矿物绿帘石为主,总体上,所有碎屑沉积样品呈现出了较为相似的重矿物组合特征。各样品含有的重矿物种类繁多,表明相应物源区具有多种岩石类型。尽管所占的比例不同,各样品均含有一定量的锆石、磷灰石和楣石。识别出的典型变质岩指示性矿物包括红帘石、绿泥石和蓝晶石,其中,红帘石、蓝晶石仅以极小的比例出现于个别样品之中。部分样品中发现了石榴石、重晶石及少量的电气石、金红石和黑云母。重矿物统计结果列于表1。

4.2 孢粉分析

尽管采用了10倍于常规样品的用量,孢粉的总数还是很低,仅有45粒,浓度为0.2粒/克。这45粒孢粉分属14个科属,其中,乔、灌木植物有:松属 *Pinus*、云杉属 *Picea*、冷杉属

表1 现代岷江、青衣江以及大邑砾岩样品重矿物统计结果(%)

Table 1 Heavy mineral compositions for samples from the modern Min River, the Qingyi River, and the Dayi conglomerate(%)

重矿物	大邑镇 (WC06)	街子古镇 (WC08)	玉堂镇 (WC09)	现代岷江 (WC30)	现代青衣江*
锆石	6	9	1	6	3
电气石	0	2	1	2	0
磷灰石	4	10	4	8	5
金红石	1	0	1	3	2
石榴石	1	8	0	7	2
方解石	0	2	0	8	0
角闪石	11	19	10	24	54
绿帘石	73	43	81	29	25
红帘石	2	0	0	0	0
绿泥石	0	2	0	8	7
蓝晶石	0	1	0	1	2
楣石	2	5	2	1	1
黑云母	0	0	0	3	0

注：* 据黎兵等，2007

表2 大邑镇样品孢粉统计表

Table 2 Spore-pollen assemblage of the Dayi town sample

样品	统计结果	统计颗粒数	百分比
乔、灌木植物孢粉	松 <i>Pinus</i>	12	27
	冷杉/云杉 <i>Abies/Picea</i>	7	16
	铁杉 <i>Tsuga</i>	1	2
	桦木 <i>Betula</i>	2	4
	胡桃 <i>Juglans</i>	4	9
	忍冬 <i>Lonicera</i>	1	2
乔、灌木植物孢粉总计		27	60
草本植物花粉	菊科 <i>Compositae</i>	2	4
	藜科 <i>Chenopodiaceae</i>	3	7
	败酱科 <i>Patrinia</i>	1	2
	莎草科 <i>Cyperaceae</i>	4	9
	草本植物花粉总计	10	22
蕨类植物孢子	铁线蕨 <i>Adiantum</i>	4	9
	水龙骨科 <i>Polypodiaceae</i>	4	9
	蕨类植物孢子总计	8	18
总计		45	100

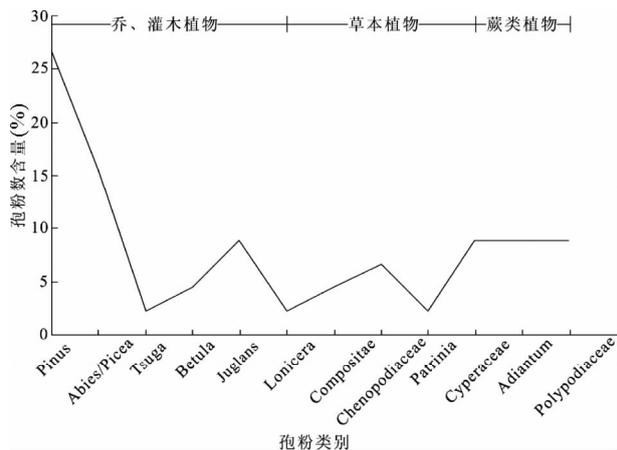


图3 大邑砾岩主要孢粉属种百分比图

Fig. 3 Diagram of major pollen genera percentage for the Dayi conglomerate sample

Abies、铁杉属 *Tsuga*、桦属 *Betula*、胡桃属 *Juglans* 和忍冬属 *Lonicera*；草本植物花粉有：菊科 *Compositae*、藜科 *Chenopodiaceae*、败酱科 *Patrinia* 和莎草科 *Cyperaceae*；蕨类植物孢子仅出现铁线蕨属 *Adiantum* 和水龙骨科 *Polypodiaceae*，孢粉类型及含量见表 2 和图 3。总体上孢粉类型以高山黯针叶林成分为主，混有少量落叶阔叶林和草本植物花粉，显示了高寒的环境。

5 讨论

5.1 重矿物的风化改造

尽管重矿物因其耐磨蚀、稳定性强、能够较多的保留其母岩的特征且对源区信号反应灵敏而在各时代沉积物源分析中得到广泛应用 (Okay and Ergün, 2005; Damiani and Giorgetti, 2008; Giorgetti *et al.*, 2009), 但是, 在沉积循环过程中, 其他因素往往会影响到重矿物组合和丰度中的原始物源区信息, 如风化、物理分选、机械破碎、成岩作用和层间溶解等。其中, 后期风化改造和漫长的后生成岩作用影响最为明显, 势必会影响到物源区判别的准确性 (Morton and Hallsworth, 1999)。在一些植被发育的地区, 由于有机质的细菌性降解, 产生了大量的酸性地下水。其相应的浸透和化学溶蚀作用, 导致沉积物表面诸如蓝晶石、角闪石、绿帘石和石榴石等重砂矿物的迅速消失, 而随着深度的继续增大, 溶蚀作用减弱, 这些副矿物又重新出现 (Friis and Johannesen *et al.*, 1974; Friis, 1976; Friis *et al.*, 1980)。通过将石榴石置于温暖的二羧酸条件下, Hansley (1987) 认为有机物产生的有机酸在一定的温度条件下将引发石榴石的快速溶解。类似地, Morton (1986) 在北海三叠纪砂岩的研究中发现滨海砂中磷灰石的含量丰富, 在边缘海环境中磷灰石的含量明显降低, 而在河流和三角洲顶部, 由于酸性地下水的影响, 磷灰石可以完全缺失。Hester (1974) 研究发现, 石榴石和绿帘石出

现于未风化的美国东南部白垩纪砂岩之中,而在风化的相同地层中则明显缺失。总之,在富含有机物的层位及其附近的层位,溶蚀作用可以迅速改变稳定重矿物的含量,甚至改变原生的重矿物组合特征,从而影响物源区的判别。许多研究结果还显示,伴随着埋藏成岩作用,许多重矿物将随着深度的变化先后消失,在相同物源区的完整剖面上显示出了不同的重矿物组合序列(Morton, 1984, 1987; Morton and Hallsworth, 2007; Milliken, 1988; Dutton, 1993)。这些结果表明,在有可能遭受后期风化或沉降改造的地层研究中,仅通过石榴石、磷灰石、蓝晶石等指示性重矿物的出现与否,很难准确判别沉积物真实的物源区。因此,为了从重矿物组合识别物源区,首要的因素是避免后期风化或沉降改造等对统计结果的影响。

前人已证实大邑镇、街子古镇和玉堂镇等成都盆地北部大邑砾岩的碎屑组分和砾石成分一致(李勇等, 2006; 黎兵等, 2007),且重矿物组合特征总体上较为相似,表明它们应为同一物源的产物。但是,来自于天然剖面与来自于新鲜剖面大邑砾岩样品在部分重矿物丰度上呈现出了明显的差异。与街子古镇新鲜剖面相比,大邑镇和玉堂镇天然剖面中含有极少甚至不含有石榴石、锆石、磷灰石和楣石等“岩浆岩”矿物丰度也较低(表1),角闪石大多蚀变为帘石(角闪石 = 绿帘石 + 绿泥石)。鉴于镜下可普遍观察到角闪石次生蚀变为绿帘石的现象(图4a),可通过角闪石与绿帘石的含量比值(AEi)来检验风化溶蚀强度(Lång, 2000)。AEi较大,则表明不稳定矿物角闪石的含量较高,遭受后期风化改造的程度较低。大邑镇和玉堂镇两样品的AEi分别为0.15和0.12,远远小于街子古镇的0.44。此外,磷灰石在浅表酸性风化环境下极不稳定,大邑镇和玉堂镇样品较低的磷灰石丰度(表1)也可在一定程度上反映样品遭受了后期风化改造。红帘石是绿帘石中Al被 Mn^{3+} 、 Fe^{3+} 代换的产物(绿帘石 + $Mn^{3+} \setminus Fe^{3+} =$ 红帘石 + Al^{3+}),伴随着风化红层的产生而出现,大邑镇样品中红帘石的出现(图4b),同样表明该区域表层已遭受强烈风化改造。

5.2 大邑砾岩的物源区

以上讨论显示,由于地表植被茂盛,风化溶蚀作用强烈,仅凭分析在大邑镇和玉堂镇大邑砾岩天然剖面中的重矿物组合特征无法准确判别相应的物源区。因此,我们以街子古镇新鲜剖面获得的大邑砾岩样品为代表,通过与现代河沙的比较,确定大邑砾岩的物质来源。

重矿物统计结果显示,岷江及青衣江这两个现代河流样品的重矿物丰度具有明显差异(表1)。在青衣江中,角闪石及其次生蚀变矿物绿帘石总量为79%,明显高于岷江的53%;且岷江的AEi为0.83,而青衣江的AEi则达到了2.16。作为中酸性岩浆岩的常见副矿物,岷江中的锆石和磷灰石的含量均高于青衣江,岷江中,石榴石的丰度为7%,而在青衣江中,其仅以极小的比例出现。这些重矿物组合特征与砾石

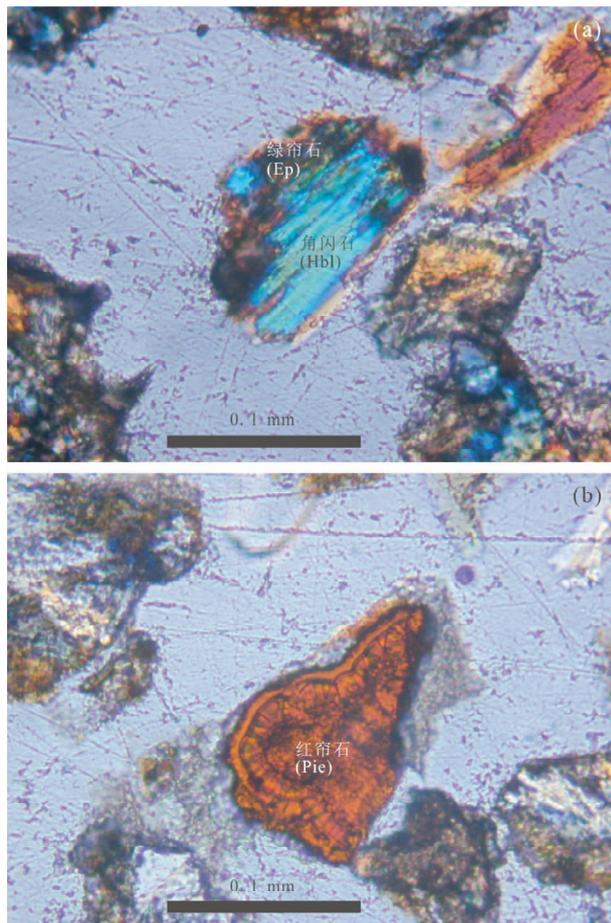


图4 大邑砾岩中正交偏光镜下角闪石绿帘石化现象(a)和大邑镇样品中红帘石的出现表明该区表层遭受强烈风化(b)

Fig. 4 Epidotization of hornblende in Dayi Formation under crossed polarizer (a) and the occurrence of the piemontite in Dayi Town sample indicates that this area has been weathered intensely (b)

成分是相吻合的,即岷江以火成岩和变质岩为主而青衣江中的灰、泥岩相对发育(李勇等, 2006; 黎兵等, 2007; 袁俊杰和陶晓风, 2008; 崔志强等, 2009)。重矿物组合特征与砾石成分的差异表明现代岷江和青衣江流域的基岩岩性组合不同,而街子古镇样品无论是重矿物组合特征(表1)还是砾石成分(李勇等, 2006; 黎兵等, 2007)均与现代岷江沉积更为相似。

李勇等(2006)和黎兵等(2007)认为与现代岷江相比,大邑砾岩天然剖面中石榴石的匮乏是由于当时的古岷江尚未溯源侵蚀到松潘-甘孜褶皱带志留系-上三叠系复理石建造中的石榴石变质带,大邑砾岩沉积时其物源仅限于龙门山一带。而本研究重矿物统计结果显示,街子古镇样品中的石榴石丰度实际上并不少于现代岷江(表1)。因此,古岷江在大邑砾岩沉积之时其流域与现代岷江已基本一致,这一结论得

到了碎屑锆石 U-Pb 年代学的支持。Kong *et al.* (2011) 通过碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征对本研究区大邑砾岩进行了系统的物源分析,碎屑锆石年代分布表明大邑砾岩与现代岷江具有相同的物源区,其物源区包括松潘-甘孜复理石沉积、彭灌杂岩以及岷江源头地区广泛发育的晚二叠至三叠纪花岗岩。这些结果进一步证实在大邑砾岩沉积之时,古岷江已溯源侵蚀到了松潘-甘孜褶皱带腹地。

5.3 大邑砾岩的成因

李春昱、李承三等最早提出四川龙门山山前一带散布甚广的褐黄-红黄色粘土砾石层是巨大冰泛携带来的(李春昱, 1934; 李承三等, 1964)。随后的研究提出了一些其他主张,包括:冲、洪积扇相(苟宗海和赵兵, 1999; 苟宗海, 2001; 曾宜君等, 2004; 黎兵等, 2007)、河流相(王凤林等, 2003)或由地震引发的滑坡、泥石流相(Wang and Meng, 2009)。

与分选、磨圆好,层理发育,几乎无沉积韵律或旋回的典型河流相沉积特征相比,冰川沉积具有韵律或旋回,冰碛物/冰水沉积物的分选差,磨圆也差,以棱角到次圆为主(施雅风等, 1989)。研究区大邑砾岩为灰褐、黄褐色半固结砾石层夹杂棕黄色岩屑砂岩透镜体,填隙物为砂、泥和钙泥质胶结(图 2a-c)。砾岩整体上分选差,以次圆-次棱角状为主,缺乏叠瓦构造,出露剖面显示为一个向上变细的大旋回。这些现象符合冰川运移的特点,而与河流沉积明显不同。而区分冰川/冰水沉积物与洪积扇、滑坡和泥石流等重力流沉积就不那么容易了,例如根据传统沉积学及地貌学特征来解读黄山、庐山一带晚新生代沉积是冰川成因还是重力流成因直至今日还远未达成统一的意见(Barbour, 1934; 李四光, 1947; 施雅风等, 1989; 何培元, 1992)。尽管冰碛物尤其是冰水沉积物与重力流碎屑沉积均具有分选、磨圆较差的特征,然而,冰川具有更强的搬运能力,能将巨大岩块长距离搬运至异地,这是有别于重力流运移的特征之一。重矿物统计结果显示,大邑砾岩中含石榴石、蓝晶石等重矿物,指示来源于远源的松潘-甘孜造山带。从砾石成分上,大邑砾岩以花岗岩和变质岩为主,明显有别于近源的沉积岩(图 1)。这些特征表明大邑砾岩以远源物质为主,搬运距离长,不属于洪积扇或滑坡、泥石流等重力作用形成的近源堆积。

此外,混杂堆积的形成必然与周围环境相联系和协调。与其他碎屑沉积物的沉积环境相比,冰碛物仅发育于寒冷低温环境,因此,利用混杂堆积中的孢粉组合来厘定沉积环境可作为辨别冰碛物/冰水沉积物与其它重力流沉积的又一重要指标。大邑砾岩的孢粉浓度极低,表明当时的沉积环境不利于植被发育,孢粉类型以高山黯针叶林成分为主,表明大邑砾岩很可能沉积于高寒环境。

综上所述,鉴于含有长距离搬运而来的远源物质,具备分选、磨圆较差且夹杂大漂砾等非河流相沉积特征以及高寒的沉积环境,我们认为大邑砾岩的形成与冰川活动有关,可能是一套冰水沉积砾石层。

5.4 大邑砾岩的形成时代

通过迄今为止第四纪连续地层中分辨率最高的孢粉记录,李吉均等(2001)恢复了青藏高原东北缘第四纪以来的环境演化特征,指出自第四纪初期的暖湿气候开始,青藏高原东北缘气温逐步降低,在 2.20 ~ 2.04Ma 期间,喜暖的乔木种类和数量减少,同时喜冷湿的云杉、冷杉等针叶树种逐渐占据上风;而至 2.04 ~ 1.80Ma 时,伴随着气候的进一步变冷,整个地区几乎仅有草本植物存在。与东北缘相似,青藏高原东缘第四纪孢粉组合显示,研究区上新世至早更新世的植物群主要以松科、山毛榉科和水龙骨科丰富为特征;自中更新世开始,常绿、落叶阔叶混交林逐渐占据上风(童国榜等, 1992; 刘耕武, 1996)。根据云贵高原 20 多个剖面近 700 个样品的孢粉资料及古地磁年表,童国榜等(1994)将松科、云杉和冷杉等针叶树种花粉作为划分中、晚上新世的主要依据,认为晚上新世后以蕨类为主的热带、亚热带阔叶树种明显减少,松、云杉和冷杉等热带、亚热带山地针叶树种逐渐占据优势。邓丽(2009)对大邑附近四川名山地区第四纪沉积物的孢粉分析结果显示中更新世以来,喜湿的蕨类植物孢粉明显增多,且随着气温的逐渐升高,至晚更新世地表已广泛发育阔叶林。从以上青藏高原东北缘、东缘和东南缘的孢粉分析结果不难看出,研究区周边地区在第四纪初期普遍经历了一个明显的降温过程,松、云杉和冷杉等山地针叶树种在这一时期逐渐占据优势,而进入中更新世后,气温回升,阔叶林树种发育。本研究中的大邑砾岩孢粉类型总体上以高山黯针叶林成分为主,混有少量落叶阔叶林树种的花粉,而标志着中更新统以后大量出现的一些蕨类和常绿阔叶林等植物花粉在组合中并不明显(表 2、图 3),符合其沉积于第四纪早期显著降温后的寒冷环境。

Kong *et al.* (2011)通过宇宙成因核素埋藏定年法最新获得的大邑砾岩沉积时代为 1.9 ~ 2.0Ma,与孢粉推测的结果相符合。因此,我们认为大邑砾岩是形成于 2.0Ma 的冰水沉积物,孢粉组合反映了青藏高原第四纪早期的寒冷环境。

6 结论

(1) 尽管重矿物分析在物源区示踪方面具有很大的优越性,但不同条件下的溶蚀作用可以迅速改变原生重矿物的丰度组合特征,并最终影响到对物源区的辨别。本文大邑砾岩样品中 A_{Ei} 指数、磷灰石丰度以及红帘石的出现均说明大邑镇和玉堂镇大邑砾岩天然剖面缺少石榴石等矿物是由于这些剖面受到后期酸性环境强烈风化改造的结果。因此,在通过重矿物组合识别物源的过程中,应注意样品沉积过程中的气候条件、埋藏环境和植被发育程度等,尽量选择具有一定埋藏深度的新鲜样品,以避免表层风化溶蚀和深埋成岩作用对重矿物统计结果的干扰。同时,在具体分析重矿物丰度结果时,应结合多种参数,如: A_{Ei} 指数等,从而避免其他因素

对物源区实际信号的影响。

(2)大邑砾岩中重矿物种类繁多,表明相应物源区具有多种岩石类型。辨别出的透明重矿物以角闪石及其次生蚀变矿物绿帘石为主,各样品均含有一定量的锆石、磷灰石和榍石。识别出的典型变质岩指示性矿物包括红帘石、绿泥石和蓝晶石,石榴石、重晶石等在部分样品中出现。除极不稳定矿物外,街子古镇新鲜剖面的大邑砾岩样品与现代岷江沉积的重矿物丰度分布十分相似。结合已有的砾石成分结果,本研究认为现代岷江与输送大邑砾岩的古岷江具有相似的物源区,当时的古岷江已切穿龙门山,深入到松潘-甘孜褶皱带内。

含有远源松潘-甘孜造山带的变质岩和现代岷江源区的火成岩,但分选及磨圆较差,富含漂砾且缺乏叠瓦构造,孢粉分析结果显示高寒环境,以上信息及已有定年结果指示大邑砾岩为形成于2.0Ma的冰水沉积。

致谢 重矿物的镜下鉴定得到了苏文研究员的指导;童国榜研究员帮助完成了孢粉分析;两位审稿人对本文提出了宝贵的意见和建议;在此一并表示感谢!

References

- Barbour GB. 1934. Analysis of Lushan glaciation problem. Bulletin of the Geological Society of China, 13(1): 647–656
- Cui ZQ, Liu DZ and Meng QM. 2009. The origin of the Pleistocene gravel in western Sichuan depression. Geology in China, 36(5): 1065–1078 (in Chinese with English abstract)
- Damiani D and Giorgetti G. 2008. Provenance of glacial-marine sediments under the McMurdo/Ross Ice Shelf (Windless Bight, Antarctica): Heavy minerals and geochemical data. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 260(1–2): 262–283
- Deng L. 2009. Research of the characteristics of Quaternary sediments and sedimentary environments in Mingshan area, Sichuan. Master Degree Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 28–47 (in Chinese with English summary)
- Dutton SP. 1993. Influence of provenance and burial history on diagenesis of Lower Cretaceous Frontier Formation sandstones, Green River basin, Wyoming. Journal of Sedimentary Research, 63(4): 665–677
- Friis H and Johannesen FB. 1974. Late Tertiary weathering of fluvial deposits at Låsby, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 23: 197–202
- Friis H. 1976. Weathering of a Neogene fluvial fining-upwards sequence at Voervadsbro, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 25: 99–105
- Friis H, Nielsen O, Friis EM and Balme B. 1980. Sedimentological and palaeobotanical investigations of a Miocene sequence at Lavsbjerg, Central Jutland, Denmark. Årbog-Danmarks Geologiske Undersøgelse, 51–67
- Galehouse JS. 1971. Point counting. In: Carver RE (ed.). Procedures in Sedimentary Petrology. New York: Wiley-Interscience, 385–407
- Giorgetti G, Talarico F, Sandroni S and Zeoli A. 2009. Provenance of Pleistocene sediments in the ANDRILL AND-1B drillcore: Clay and heavy mineral data. Global and Planetary Change, 69(3): 94–102
- Gou ZH and Zhao B. 1999. The Cretaceous and Tertiary systems in Dayi and Chongzhou regions, Sichuan. Journal of Stratigraphy, 25(1): 28–33 (in Chinese with English abstract)
- Gou ZH. 2001. Characteristics of Jurassic-Tertiary conglomerates and depositional environment in the Dayi-Wenchuan area, Sichuan. Regional Geology of China, 20(1): 25–32 (in Chinese with English abstract)
- Hansley PL. 1987. Petrologic and experimental evidence for the etching of garnets by organic acids in the Upper Jurassic Morrison Formation, northwestern New Mexico. Journal of Sedimentary Research, 57(4): 666–681
- He PY. 1992. Quaternary Glaciations and Environment in Lushan Mountain Jiangxi China. Beijing: Seismological Press, 1–167 (in Chinese)
- He YW. 1992. The age of formation of the Chengdu Basin and features of its early deposits. Geological Review, 38(2): 149–156 (in Chinese with English abstract)
- Hester NC. 1974. Post-depositional subaerial weathering effects on the mineralogy of an Upper Cretaceous sand in southeastern United States. Journal of Sedimentary Research, 44(2): 363–373
- Hu JM, Meng QR, Shi YR and Qu HJ. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implications. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 867–880 (in Chinese with English abstract)
- Kirby E and Whipple K. 2001. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. Geology, 29(5): 415–418
- Kirby E, Whipple K, Tang W and Chen Z. 2003. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. Journal of Geophysical Research, 108(B4): 2217
- Kong P, Zheng Y and Fu BH. 2011. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of Late Cenozoic deposits in the Sichuan Basin: Implications for Early Quaternary glaciations in east Tibet. Quaternary Geochronology, 6(3–4): 304–312
- Lång LO. 2000. Heavy mineral weathering under acidic soil conditions. Applied Geochemistry, 15(4): 415–423
- Lee SG. 1947. Quaternary glaciations in the Lushan area. In: Lee SG (ed.). Contributions from the National Institute of Geology, Academia Sinica. Nanking: Institute of Geology, Academia Sinica, 28–33 (in Chinese)
- Li B, Li Y, Zhang KJ, Zhang YX, Zhang Y, Wei QG and Wang Y. 2007. Provenance of the siliciclastic rocks of the Late Cenozoic Dayi Formation and drainage change at eastern margin of the Tibetan Plateau. Quaternary Sciences, 27(1): 64–73 (in Chinese with English abstract)
- Li CS, Wu YS, Li YZ and Lu DS. 1964. Quaternary glaciation relics in east slope of southern Longmen Mountain and its hillside. In: Chinese Association for Quaternary Research (ed.). Collected Works of Quaternary Glaciation Relics Research in China. Beijing: Science Press, 14–84 (in Chinese with English abstract)
- Li CY. 1934. Causes Reaches of the Upper Yangtze River Valley. Acta Geologica Sinica, 13: 107–118 (in Chinese with English abstract)
- Li JJ, Fang XM, Pan BT, Zhao ZJ and Song YG. 2001. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. Quaternary Sciences, 21(5): 381–391 (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Zeng YF and Yi HS. 1995. Sedimentary and Tectonic Evolution of the Longmen Shan Foreland Basin, Western Sichuan, China. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1–91 (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Li YZ, Zhou RJ, Wang GZ, Si GY, Wang FL and Liang XZ. 2002. The discovery of the Quaternary fossil ice-wedges in Chengdu plain. Journal of Geomechanics, 8(4): 341–346 (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Allen PA, Densmore AL and Xu Q. 2003a. Evolution of the Longmen Shan foreland basin (western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian Orogeny. Basin Research, 15(1): 117–138
- Li Y, Cao SY, Zhou RJ and Densmore AL. 2003b. Field studies of Late Cenozoic Minjiang River incision rate and its constraint on morphology of the eastern margin of the Tibetan Plateau. In: Lee

- JHW and Lam KM (eds.). Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management. London: AA Balkema Publishers, 1: 2091–2097
- Li Y, Zhou RJ, Densmore AL, Ellis MA, Li YZ, Allen PA, Steffen D, Li B, Zhang Y, Richardson NJ, Wang FL, He YL, Xi XH, Li XG, Si GY and Wang M. 2006. Continental Dynamics and Geological Responses of the Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1–148 (in Chinese)
- Liu GW. 1996. Late Cenozoic palynological sequence of eastern Qinghai-Xizang Plateau and its bearing on palaeogeography. Acta Micropalaeontologica Sinica, 13(4): 363–372 (in Chinese with English abstract)
- Milliken KL. 1988. Loss of provenance information through subsurface diagenesis in Plio-Pleistocene sandstones, northern Gulf of Mexico. Journal of Sedimentary Research, 58(6): 992–1002
- Morton AC. 1984. Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones from the North Sea basin. Clay Minerals, 19(3): 287–308
- Morton AC. 1986. Dissolution of apatite in North Sea Jurassic sandstones: Implications for the generation of secondary porosity. Clay Minerals, 21(4): 711–733
- Morton AC. 1987. Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the Paleocene Forties sandstone, central North Sea. Journal of Sedimentary Research, 57(6): 1027–1032
- Morton AC and Hallsworth. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, 124: 3–29
- Morton AC and Hallsworth C. 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. In: Mange MA and Wright DT (ed.). Heavy Minerals in Use: Developments in Sedimentology Series 58. Amsterdam: Elsevier, 215–245
- Okay N and Ergün B. 2005. Source of the basinal sediments in the Marmara Sea investigated using heavy minerals in the modern beach sands. Marine Geology, 216(1–2): 1–15
- Raymo ME, Ruddiman WF, Backman J, Clement BM and Martinson DG. 1989. Late Pliocene variation in Northern Hemisphere ice sheets and North Atlantic deep water circulation. Paleoceanography, 4(4): 413–446
- Roger F, Malavieille J, Leloup PH, Calassou S and Xu Z. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garzê Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 225(5): 465–481
- Ruddiman WF, Raymo ME, Martinson DG, Clement BM and Backman J. 1989. Pleistocene evolution: Northern Hemisphere ice sheets and North Atlantic Ocean. Paleoceanography, 4(4): 353–412
- Shao L, Li CA, Zhang YF, Kang CG and Yang J. 2010. Heavy mineral assemblages in modern sediments of the Chuanjiang River. Geological Science and Technology Information, 29(3): 49–54 (in Chinese with English abstract)
- Shi YF, Cui ZJ and Li JJ. 1989. Issues of Quaternary Glaciations and Environment in China. Beijing: Science Press, 133–186 (in Chinese)
- Tong GB, Zhang JP and Fan SX. 1992. Distribution of Quaternary palynoflora in China. Marine Geology & Quaternary Geology, 12(3): 45–56 (in Chinese with English abstract)
- Tong GB, Zhang JP, Yang XD, Luo BX, Wang YZ and Chen PY. 1994. Late Cenozoic palynoflora and environment changes in Yunnan-Guizhou plateau. Marine Geology & Quaternary Geology, 14(3): 91–104 (in Chinese with English abstract)
- Wang E and Meng QR. 2009. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Longmenshan fault belt. Science in China (Series D), 52(5): 579–592
- Wang FL, Li Y, Li YZ, Wang M and Zhang YX. 2003. Sedimentary characteristics of the Cenozoic Dayi conglomerate in Chengdu Basin. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 30(2): 139–146 (in Chinese with English abstract)
- Worley BA and Wilson CJL. 1996. Deformation partitioning and foliation reactivation during transpressional orogenesis, an example from the Central Longmen Shan, China. Journal of Structural Geology, 18(4): 395–411
- Worley BA, Powell R and Wilson CJL. 1997. Crenulation cleavage formation: Evolving diffusion, deformation and equilibration mechanisms with increasing metamorphic grade. Journal of Structural Geology, 19(8): 1121–1135
- Xu ZQ, Hou LW and Wang ZX. 1992. Orogenic Processes of the Songpan-Ganze Orogenic Belt of China, Beijing: Geological Publishing House, 1–190 (in Chinese with English abstract)
- Yang SY, Wang ZB, Guo Y, Li CX and Cai JG. 2009. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication. Journal of Asian Earth Sciences, 35(1): 56–65
- Yuan JJ and Tao XF. 2008. The features of gravel bed and drainage evolution in the Qingyi River valley in the Mingshan-Danling Region, Sichuan. Acta Geologica Sinica, 28(1): 6–12 (in Chinese with English abstract)
- Zeng YJ, Yang XJ, Li YQ, Xie QX, Zhu B and Hao XF. 2004. Tectonic significance of Meso-Cenozoic conglomerate in the south of the West Sichuan foreland basin. Acta Geologica Sichuan, 24(4): 198–201 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZL and Ruan MD. 2006. New evidences on genesis of klippe in the Longmenshan Geopark. Geological Review, 52(4): 501–509 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 崔志强, 刘登忠, 孟庆敏. 2009. 川西凹陷地区更新统砾石层沉积成因探讨. 中国地质, 36(5): 1065–1078
- 邓丽. 2009. 四川名山地区第四纪沉积物特征及沉积环境探讨. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 28–47
- 苟宗海, 赵兵. 1999. 四川大邑-崇州地区的白垩、第三系. 地层学杂志, 25(1): 28–33
- 苟宗海. 2001. 四川大邑-汶川地区侏罗-第三系砾岩特征及沉积环境. 中国区域地质, 20(1): 25–32
- 何培元. 1992. 庐山第四纪冰期与环境. 北京: 地震出版社, 1–167
- 何银武. 1992. 论成都盆地的成生时代及其早期沉积物的一般特征. 地质论评, 38(2): 149–156
- 胡建民, 孟庆任, 石玉若, 渠洪杰. 2005. 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 21(3): 867–880
- 黎兵, 李勇, 张开均, 张玉修, 张毅, 魏庆国, 汪洋. 2007. 青藏高原东缘晚新生代大邑砾岩的物源分析与水系变迁. 第四纪研究, 27(1): 64–73
- 李承三, 吴燕生, 李永昭, 卢登仕. 1964. 四川龙门山南段东坡及其山前带第四纪冰川遗迹. 见: 中国第四纪研究委员会编. 中国第四纪冰川遗迹研究文集. 北京: 科学出版社, 14–84
- 李春昱. 1934. 扬子江上游河谷之成因. 地质学报, 13: 107–118
- 李吉均, 方小敏, 潘福田, 赵志军, 宋友桂. 2001. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 21(5): 381–391
- 李四光. 1947. 冰期之庐山. 见: 李四光主编. 前国立中央研究院地质研究所专刊. 南京: 南京地质研究所, 28–33
- 李勇, 曾允孚, 伊海生. 1995. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化. 成都: 成都科技大学出版社, 1–91
- 李勇, 李永昭, 周荣军, 王国芝, 司光影, 王凤林, 梁兴中. 2002. 成都平原第四纪化石冰楔的发现及古气候意义. 地质力学学报, 8(4): 341–346

- 李勇, 周荣军, Densmore AL, Ellis MA, 李永昭, Allen PA, Steffen D, 黎兵, 张毅, Richardson NJ, 王凤林, 何玉林, 蒯晓虹, 黎小刚, 司光影, 王谋. 2006. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京: 地质出版社, 1-148
- 刘耕武. 1996. 青藏高原东部地区晚新生代孢粉组合特征及其古地理意义. 微体古生物学报, 13(4): 363-372
- 邵磊, 李长安, 张玉芬, 康春国, 杨建. 2010. 长江川江段现代沉积物的重矿物组合特征. 地质科技情报, 29(3): 49-54
- 施雅风, 崔之久, 李吉钧. 1989. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 中国科学出版社, 133-186
- 童国榜, 张俊牌, 范淑贤. 1992. 中国第四纪孢粉植物群的分布. 海洋地质与第四纪地质, 12(3): 45-56
- 童国榜, 张俊牌, 羊向东, 罗宝信, 王毓钊, 陈佩英. 1994. 云贵高原晚新生代孢粉植物群与环境变迁. 海洋地质与第四纪地质, 14(3): 91-104
- 王凤林, 李勇, 李永昭, 王谋, 张玉修. 2003. 成都盆地新生代大邑砾岩的沉积特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(2): 139-146
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1-190
- 袁俊杰, 陶晓风. 2008. 四川名山-丹棱地区青衣江流域的砾石层特征及水系演化. 地质学报, 28(1): 6-12
- 曾宜君, 杨学俊, 李云泉, 谢启兴, 朱兵, 郝雪峰. 2004. 川西前陆盆地南部中生代砾岩的构造意义. 四川地质学报, 24(4): 198-201
- 周自隆, 阮明德. 2006. 龙门山国家地质公园飞来峰成因的新证据. 地质论评, 52(4): 501-509