

## 川北及川西北地区早寒武世物源及古地理响应\*

石学文<sup>1,3</sup> 韦明洋<sup>1,2</sup> 王兴志<sup>1,2</sup> 朱逸青<sup>3</sup> 李 勇<sup>3</sup>  
张 驰<sup>3</sup> 刘一星<sup>1,2</sup> 张咏仪<sup>1,2</sup> 侯海莉<sup>1,2</sup>

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

2 油气藏地质与开发全国重点实验室, 西南石油大学, 四川成都 610500

3 中国石油西南油气田分公司, 四川成都 610051

**摘 要** 川北及川西北地区早寒武世沉积记录了扬子板块北西缘多物源体系差异演化的关键信息。以川西北广元—北川和川北南江—旺苍地区下寒武统露头剖面为研究对象, 综合运用重矿物鉴定、岩屑成分统计、锆石阴极发光 (CL) 图像及古水流测量等沉积学分析, 系统开展了该时期物源示踪与古地理重建。结果表明: (1) 研究区早寒武世存在摩天岭、彭灌、汉南 3 大物源区, 三者形成时间、构造属性及母岩性质上显著不同; (2) 川西北地区受古特提斯洋俯冲控制, 摩天岭物源区主要持续提供酸性岩浆岩及硅质岩碎屑, 彭灌物源区于第二段沉积期始现水下隆起, 至沧浪铺期演化为暴露的火山岛弧, 主要提供基性岩浆岩 (玄武岩) 碎屑; (3) 川北地区受古秦岭洋活动影响, 汉南物源区呈阶段性演化, 筲竹寺组—沧一段 (仙女洞组) 沉积期被淹没, 川北发育鲕粒灰岩, 沧二段 (阎王碛组) 暴露供源, 形成冲积扇—扇三角洲粗碎屑沉积; (4) 沧浪铺晚期 3 大物源区全部暴露, 同时供源, 形成川西北持续碎屑充填与川北三段式沉积响应的古地理分异格局。本研究为扬子北西缘早寒武世多板块相互作用提供了新的沉积学证据。

**关键词** 物源分析 古地理响应 早寒武世 川北及川西北地区**第一作者简介** 石学文, 男, 1982 年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事页岩油气勘探开发方面的研究工作。E-mail: shixuewen@petrochina.com.cn。**通讯作者简介** 韦明洋, 男, 1991 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事沉积及古地理学方面的教学与研究。E-mail: mingyang-wei@swpu.edu.cn。王兴志, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事储层沉积学等方面的教学与研究。E-mail: wxzswpu@163.com。

中图分类号: P534.41 文献标志码: A

Provenance and palaeogeographic response of the Early Cambrian  
in northern and northwestern Sichuan BasinSHI Xuewen<sup>1,3</sup> WEI Mingyang<sup>1,2</sup> WANG Xingzhi<sup>1,2</sup> ZHU Yiqing<sup>3</sup> LI Yong<sup>3</sup>  
ZHANG Chi<sup>3</sup> LIU Yixing<sup>1,2</sup> ZHANG Yongyi<sup>1,2</sup> HOU Haili<sup>1,2</sup>

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

3 Southwest Oil and Gasfield Company, PetroChina, Chengdu 610051, China

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

\* 四川省自然科学基金重点项目 (编号: 24NSFSC0093) 和国家自然科学基金项目 (编号: 42502154) 联合资助。[Co-funded by the Key Project of Natural Science Foundation of Sichuan Province, China (No. 24NSFSC0093) and the Project of National Natural Science Foundation of China (No. 42502154)]

收稿日期: 2026-02-21 改回日期: 2026-04-28

**Abstract** The Early Cambrian sedimentary successions in northern and northwestern Sichuan Basin record critical information on the differential evolution of multiple provenance systems along the northwestern margin of the Yangtze Block. This study focuses on Lower Cambrian outcrop sections in the Guangyuan-Beichuan area (northwestern Sichuan) and the Nanjiang-Wangcang area (northern Sichuan). Through integrated sedimentological analyses including heavy mineral identification, lithic fragment composition statistics, cathodoluminescence (CL) imaging of detrital zircons, and palaeocurrent measurements, a systematic provenance tracing and palaeogeographic reconstruction were conducted. The results indicate that: (1) Three major source areas existed during the Early Cambrian in the study area—the Motianling, Pengguan, and Hannan provenances—which differ significantly in formation age, tectonic affinity, and parent rock lithology. (2) In northwestern Sichuan Basin, controlled by Palaeo-Tethyan subduction, the Motianling provenance continuously supplied felsic igneous and siliceous rock detritus, whereas the Pengguan provenance first emerged as a submarine high during the second member of the Qiongzhusi Formation and evolved into an exposed volcanic island arc by the Canglangpu stage, predominantly supplying mafic igneous (basaltic) detritus. (3) In northern Sichuan Basin, influenced by the Proto-Qinling Ocean, the Hannan provenance exhibited episodic evolution: during deposition of the Qiongzhusi Formation through the first member of the Canglangpu Formation (Xianfengdong Formation), it remained submerged and oolitic limestones developed in the northern Sichuan area; during the second member of the Canglangpu Formation (Yanwangbian Formation), it became subaerially exposed, forming alluvial fan-delta coarse clastic deposits. (4) By the late Canglangpu stage, all three source areas were exposed simultaneously, resulting in a palaeogeographic differentiation pattern characterized by sustained clastic infilling in northwestern Sichuan and a tripartite sedimentary response in northern Sichuan. This study provides new sedimentological evidence for multi-plate interactions along the northwestern margin of the Yangtze Block during the Early Cambrian.

**Key words** provenance analysis, palaeogeographic response, Early Cambrian, northern and northwestern Sichuan Basin

**About the first author** SHI Xuewen, born in 1982, is a master and senior engineer. He is mainly engaged in the research of shale oil and gas exploration and development. E-mail: shixuewen@petrochina.com.cn.

**About the corresponding authors** WEI Mingyang, born in 1991, is a Ph.D. and assistant researcher. He is mainly engaged in the research of sedimentology and palaeogeography. E-mail: mingyang-wei@swpu.edu.cn. WANG Xingzhi, born in 1964, is a Ph.D. and professor. He is mainly engaged in teaching and research in reservoir sedimentology. E-mail: wxzswpu@163.com.

## 0 引言

源汇系统研究将沉积物从源区剥蚀、搬运输导到汇区堆积的全过程作为统一系统进行统筹分析(赵红格和刘池洋, 2003; 朱红涛等, 2017; 朱淑玥等, 2023), 为重建古老盆地物源体系与古地理格局提供了重要方法论支撑。扬子板块北西缘下寒武统沧浪铺组是四川盆地重要沉积层系, 其物源体系与沉积格局研究长期存在分歧。物源方面: 李皎和何登发(2014)认为受汉南古陆和摩天岭古陆

双重影响; 张英利等(2019)提出汉南古陆不发育, 主要物源为碧口地块和康滇古陆; 李红等(2021)则强调汉南古陆持续供源; 邓豪爽等(2024)进一步提出沧一段沉积受汉南古陆、绵阳—长宁拉张槽及剑阁—旺苍凹陷三重控制。李永成等(2025)对彭灌地区黄水河群碎屑锆石年代学研究表明, 扬子西缘在新元古代早期已处于活动大陆边缘环境, 但彭灌地区在早寒武世是否作为独立火山岛弧物源区供源, 以及川北与川西北沉积响应

差异的物源控制机制等问题,尚缺乏系统研究。沉积相方面,前人对下寒武统各组段开展了系统研究,但不同层位之间的沉积格局演变仍存在认识差异。麦地坪组—筇竹寺组沉积期,受裂陷槽活动控制,沉积相带分异显著(郑马嘉等,2026),筇竹寺组在不同构造位置发育了各异的沉积体系(范海经等,2021;杨雨然等,2024)。至沧浪铺组沉积期,沉积格局发生明显转变,严威等(2020)提出沧一段存在“西浊东清”格局,周刚等(2024)识别出沧一段东西分异特征;上覆龙王庙组则整体转变为碳酸盐岩台地沉积。上述沉积格局的时空演变与物源体系演化密切相关,但不同学者对沉积相展布的控制因素解释不一,其分歧的核心在于物源区属性与供源时限缺乏系统约束。

以川西北广元—北川及川北南江—旺苍地区下寒武统露头剖面为研究对象,综合运用重矿物鉴定、岩屑成分统计、锆石 CL 图像及古水流测量,系统开展物源示踪与沉积体系研究,旨在明确川北及川西北地区早寒武世物源区分布,各自母岩属性、供源方向与演化阶段,落实川北与川西北沉积差异的物源控制机制,并在此基础上,建立源汇耦

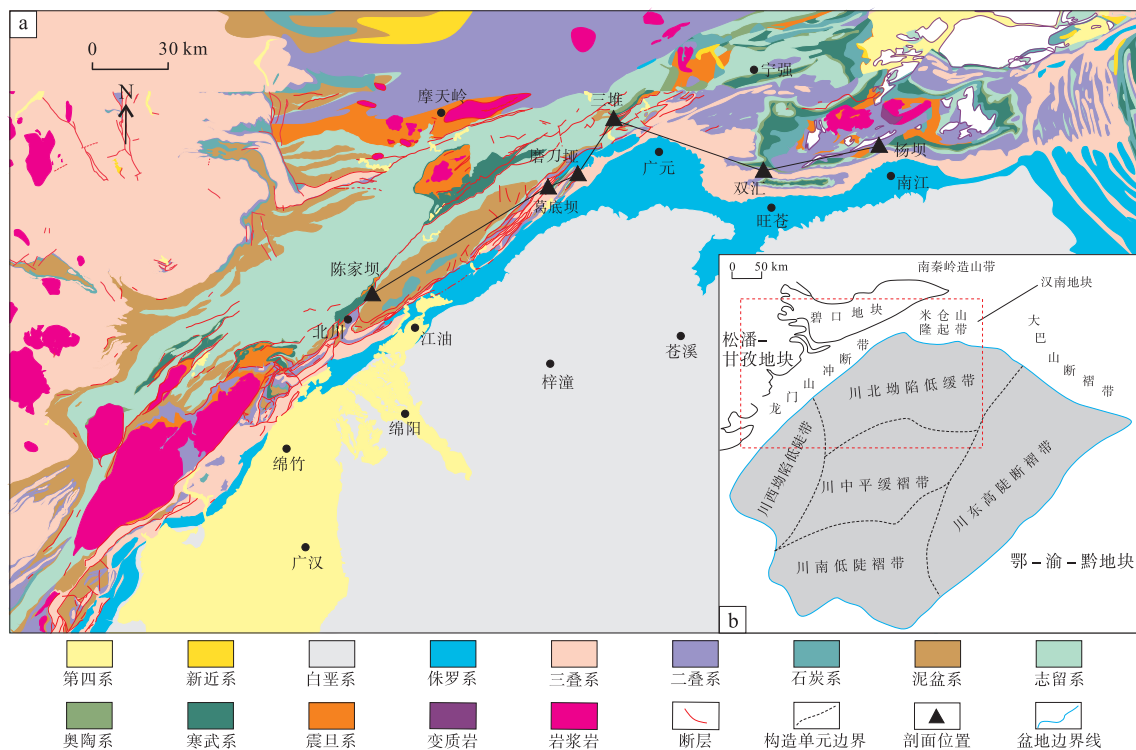
合模式,为区域古地理重建提供依据。

## 1 区域地质背景

### 1.1 地理位置与构造位置

四川盆地地处中国西南部,主体位于四川省中东部及重庆市大部,并向南延伸至贵州北部、向北延伸至陕西南部。研究区位于四川盆地西北部及北部,北侧以汉中市宁强县为界,东侧以巴中市南江县为界,南侧以德阳市广汉市为界,西侧以绵阳市北川县为界,涵盖广元、旺苍、江油、北川、苍溪等县市(图 1)。

构造位置上,研究区处于扬子板块西北缘,是受龙门山构造带与米仓山隆起带共同控制的复杂构造区(Xu *et al.*, 2021),西部紧邻龙门山冲断带,北部与米仓山隆起带相接。四川盆地为扬子地台的次一级构造单元,是经历多期构造演化形成的菱形大型多旋回叠合盆地,周缘有龙门山冲断带、米仓山隆起带、大巴山断褶带 3 个构造区,内部可划分为川东高陡断褶带、川南低陡褶带、川中平缓褶带、川西拗陷低陡带、川北拗陷低缓带 5 个次一级



a—地质简图修改自区域地质报告; b—构造分区位置图修改自谷志东等(2016)

图 1 四川盆地川北—川西北地区地质简图及构造分区位置图

Fig. 1 Geological sketch map and tectonic division location map of the northern and northwestern Sichuan Basin



与下伏筇竹寺组呈整合接触，川西地区以碎屑岩为主，川北地区发育鲕粒灰岩，称仙女洞组；沧二段整合于沧一段之上，与上覆龙王庙组连续沉积，岩性以碎屑岩为主，川北地区称阎王碛组。上述“西碎东清”的岩相分异特征，是研究区物源体系差异演化的直接沉积响应。鉴于不同地层分区命名各异，采用统一的沧浪铺组二分方案（沧一段、沧二段）（严威等，2020），为物源分析与沉积响应研究提供统一地层格架（表 1）。

## 2 研究剖面与分析方法

选取川西北及川北地区 6 条（图 1）下寒武统露头剖面开展系统研究。川西北地区包括广元葛底坝剖面、磨刀垭剖面、三堆剖面及北川陈家坝剖面，川北地区包括南江杨坝剖面和旺苍双汇剖面。在层位选择上，由于研究区麦地坪组和筇竹寺组以硅质岩、粉砂岩、泥岩等细粒沉积为主，川北沧一段（仙女洞组）及龙王庙组主要发育碳酸盐岩，均不适合开展物源分析，因此物源研究工作主要针对沧浪铺组碎屑岩段展开，具体包括川西北地区沧浪铺组碎屑岩及川北地区沧二段（阎王碛组）岩屑砂岩与砾岩层段。分析方法包括：

1) 野外实测剖面，详细记录岩性组合与沉积构造，划分沉积相类型；

2) 系统采集砂岩和砾岩样品，经重液分离与磁选富集重矿物，统计重矿物组合特征（于中石油勘探开发研究院杭州分院完成）；

3) 磨制薄片进行岩屑成分统计，判别母岩类型；

4) 利用扫描电镜采集锆石阴极发光图像（于中石油勘探开发研究院杭州分院完成），根据环带结构与发光特征判别锆石成因；野外测量波痕、斜层理及砾石叠瓦状排列等古水流标志，经产状校正后恢复古流向（杜远生，2018）。

## 3 物源区特征

通过重矿物组合、岩屑成分、锆石阴极发光（CL）图像及古水流测量等多元物源示踪方法的综合分析，在研究区早寒武世沉积中识别出 3 个不同属性的物源区，分别为摩天岭物源区、彭灌物源区及汉南物源区。三者形成时间、构造属性、母岩

性质、供源方向及演化阶段上存在显著差异。

### 3.1 摩天岭物源区

代表剖面为广元地区的葛底坝剖面、磨刀垭剖面及三堆剖面。

重矿物特征：3 个剖面的重矿物组合各具特色，综合反映了摩天岭物源区的母岩属性与沉积环境。葛底坝剖面重矿物以黄铁矿（25.55%）和电气石（23.21%）占优势，角闪石含量为 14.03%，锆石亦有一定含量，ZTR 平均值约 0.19（图 2）。高电气石和锆石的存在明确指向酸性岩浆岩物源，而高角闪石则指示基性岩物源的贡献，反映源区岩性较为复杂（Hubert, 1962; Haughton *et al.*, 1991; 符芳亮等，2025）。磨刀垭剖面 ZTR 指数为 0.3，表明碎屑经历了中等程度的风化但搬运距离不远；不稳定矿物（磷灰石、角闪石）与稳定矿物（电气石）共存，是典型近源搬运的标志（图 2）（Morton and Hallsworth, 1994）。三堆剖面重矿物以极高的赤褐铁矿（32.18%）和磷灰石（21.76%）为特征（图 2）。极高的磷灰石反映酸性岩浆岩（花岗岩）物源的快速剥蚀，极高的赤褐铁矿则是“近源快速氧化沉积”的典型组合，指示碎屑曾暴露于富氧环境，构造活动强烈、山体快速隆升、基岩被快速剥蚀并短距离搬运至山前堆积（Blatt and Tuten, 1981）。

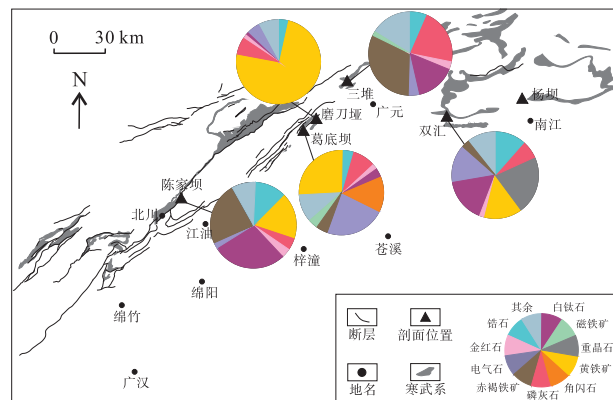


图 2 川北及川西北地区寒武系沧浪铺组重矿物统计  
Fig. 2 Heavy mineral statistical of the Cambrian Canglangpu Formation in northern and northwestern Sichuan Basin

岩屑特征：砂岩薄片鉴定表明，葛底坝剖面沧浪铺组岩屑以粉砂岩岩屑、硅质岩岩屑为主，见海绿石，颗粒分选中等至差，形态为次棱角一次圆状（图 3-a）。磨刀垭剖面沧浪铺组岩屑砂岩中可见

硅质岩岩屑和粉砂岩岩屑，海绿石大量存在（图 3-b）。三堆剖面岩屑以粉砂岩、硅质岩为主。3 条剖面均未见典型的基性火山岩岩屑，碎屑颗粒分选中等至差，形态以次棱角状一次圆状为主，反映近源搬运的沉积特征。

锆石 CL 图像特征：锆石阴极发光图像显示（图 4-a, 4-b, 4-c），绝大多数锆石颗粒具有清晰的振荡环带结构，颗粒形态棱角分明，长宽比较大。这些特征是典型岩浆成因锆石的鉴别标志，且棱角状形态指示搬运距离较短，物源区为就近的岩浆岩体。

砾石特征：沧浪铺组砾岩层中砾石成分以黑色硅质岩为主，含少量白色石英岩及红色花岗岩砾石（图 5-f），其黑色硅质岩源自早期麦地坪组。砾石磨圆度中等，多为次圆状一次棱角状，分选中等，反映搬运距离有限但经历了一定程度的磨蚀改造。三堆剖面砾岩极发育，磨圆较好的砾石指示高能冲积扇或辫状河环境。砾石扁平面优势方位倾向 NW，指示物源供给方向为自 NW 向 SE（图 5；图 6）。

古水流方向：野外古水流标志测量结果综合表明（图 5-a 到 5-f；图 6），波痕走向主体为 NE-SW 向，斜层理优势倾向为 SE 向，砾石扁平面倾向以 NW 向为主。综合判断古水流方向为自 NW 向 SE 流动，物源区位于研究区西北方向。

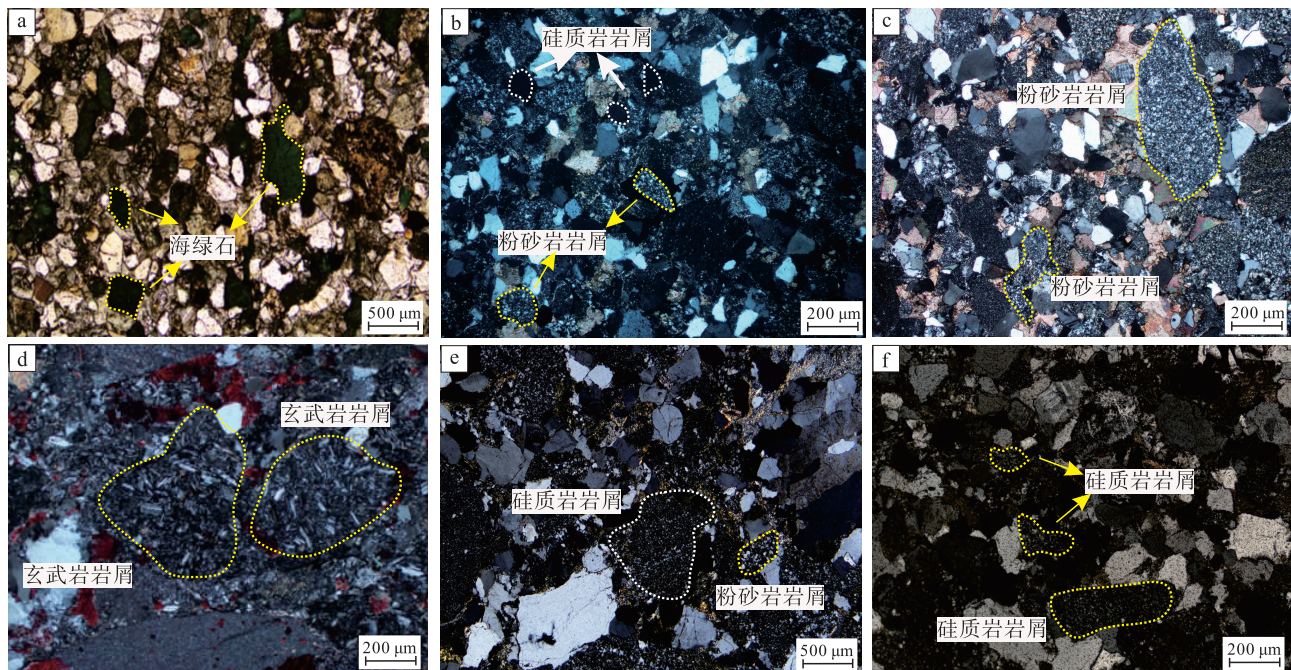
综上，摩天岭物源区母岩以酸性岩浆岩（基底）和沉积硅质岩（麦地坪组）为主，伴有基性岩及变质岩的贡献，沉积环境为浅海还原条件，搬运距离较短，供源方向为 NW→SE。

### 3.2 彭灌物源区

代表剖面为绵阳北川陈家坝剖面。

重矿物特征：陈家坝剖面沧浪铺组砂岩重矿物分析显示（图 2），重矿物组合以白钛石（28.41%）和赤褐铁矿（22.05%）占绝对优势，黄铁矿、锆石等含量次之。白钛石是基性火山岩中钛铁矿的蚀变产物，赤褐铁矿是含铁矿物氧化的结果，这一组合明确反映基性物源区的属性，与摩天岭物源区的黄铁矿—电气石组合形成鲜明对比。

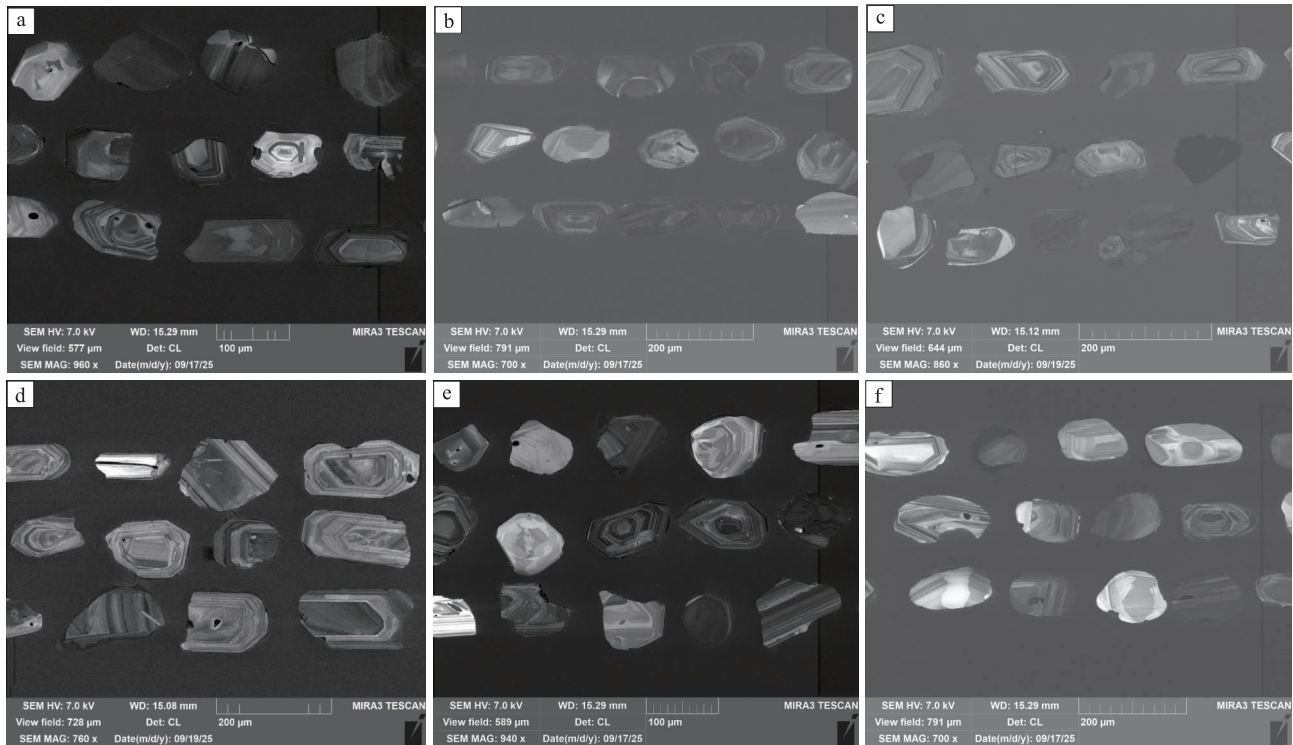
岩屑特征：砂岩薄片鉴定结果显示（图 3-d），



a—葛底坝剖面，沧浪铺组上部粉—细砂岩，含海绿石；b—磨刀垭剖面，沧浪铺组下部粉—细砂岩，见硅质岩岩屑及粉砂岩岩屑；c—三堆剖面，沧浪铺组下部粉—细砂岩，见粉砂岩岩屑；d—陈家坝剖面，筇竹寺组上部粉砂岩，见玄武岩岩屑；e—双汇剖面，沧浪铺组上部粉—细砂岩，见硅质岩岩屑及粉砂岩岩屑；f—杨坝剖面，筇竹寺组上部粉砂岩，见硅质岩岩屑及粉砂岩岩屑

图 3 川北及川西北地区寒武系沧浪铺组典型岩屑类型显微特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of typical lithic fragment types of the Cambrian Canglangpu Formation in northern and northwestern Sichuan Basin



a—葛底坝剖面沧浪铺组样品锆石阴极发光图像；b—磨刀垭剖面沧浪铺组样品锆石阴极发光图像；c—三堆剖面沧浪铺组样品锆石阴极发光图像；d—陈家坝剖面沧浪铺组样品锆石阴极发光图像；e-f—双汇剖面沧浪铺组样品锆石阴极发光图像

图 4 川北及川西北地区寒武系沧浪铺组锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons from the Cambrian Canglangpu Formation in northern and northwestern Sichuan Basin

岩屑颗粒中玄武岩岩屑占比极高，是彭灌物源区最具鉴别意义的特征组分。此外可见粉砂岩岩屑、玉髓及少量变质岩岩屑。玄武岩岩屑的大量出现直接证明近源存在基性火山岩体，为火山岛弧的识别提供了关键岩石学证据。碎屑颗粒分选中等至差，形态以次棱角状为主，指示搬运距离较近。砾石在剖面中较少出现，反映该剖面距离物源区较近且沉积时期水动力条件中等，不足以形成大规模的粗碎屑堆积。

**锆石 CL 图像特征：**锆石阴极发光图像显示（图 4-d），颗粒具有清晰的振荡环带，形态棱角分明，多呈相对大的长宽比形态。这些特征指示岩浆成因锆石且搬运距离较短，与基性火山岩的物源属性相吻合。

**古水流方向：**野外古水流标志测量表明（图 5-g；图 6），波痕走向主体为 NE-SW 向，斜层理优势倾向为 SE 向，综合指示古水流方向为自 NW 向 SE，与摩天岭物源区的供源方向基本一致，反映二者在空间上相邻、在供源方向上具有一定的协同性。

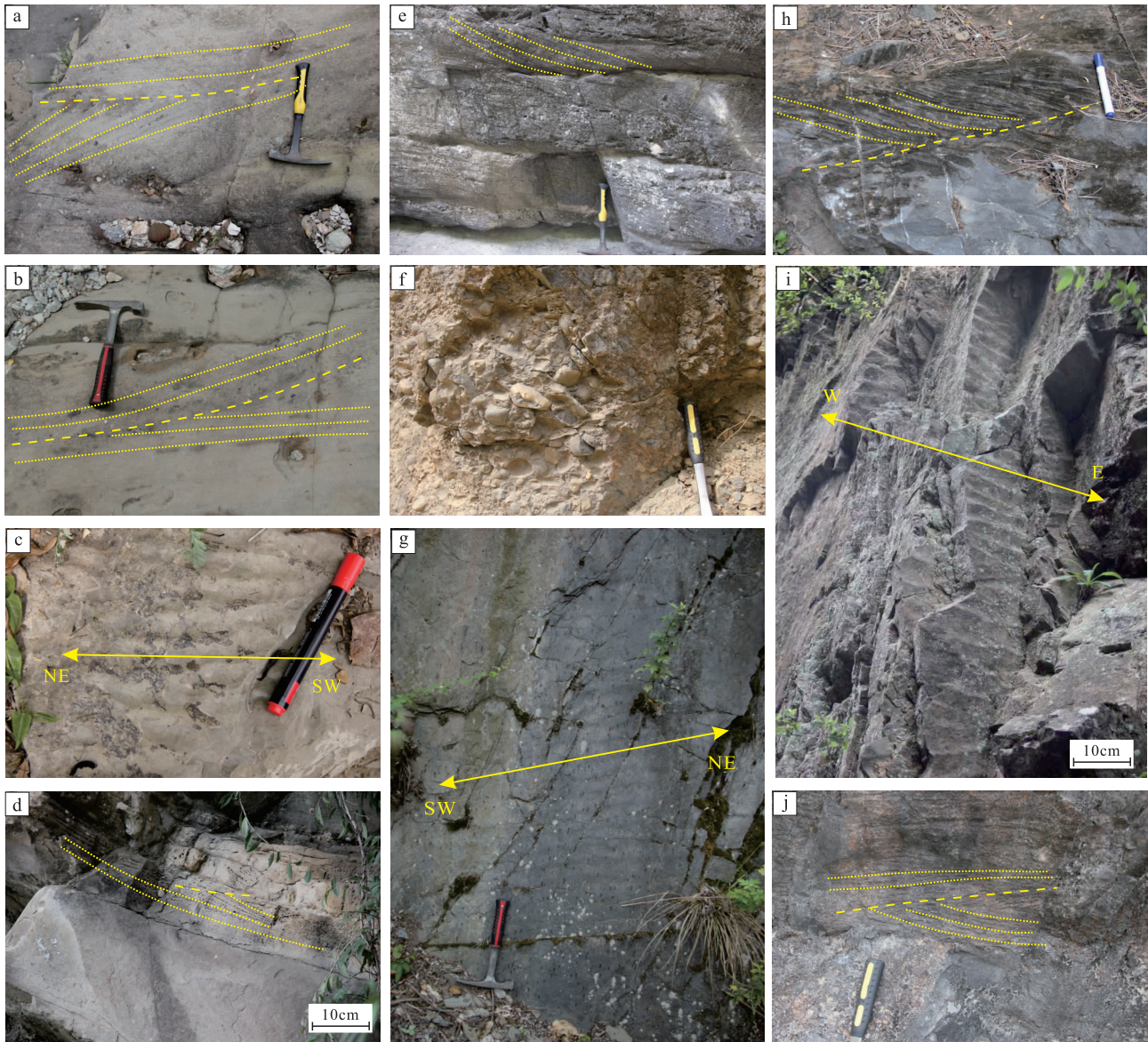
综上，彭灌物源区母岩以基性火山岩（玄武岩）为主，重矿物组合以白钛石+赤褐铁矿为标志，玄武岩岩屑的大量出现是其关键鉴别特征，供源方向为 NW→SE。

### 3.3 汉南物源区

代表剖面为南江的杨坝剖面和旺苍的双汇剖面。

**重矿物特征：**以双汇剖面为例，沧二段砂岩重矿物分析结果显示（图 2），重矿物组合以重晶石（21.42%）和白钛石（16.77%）为主，电气石（14.59%）、锆石（11.39%）、黄铁矿等矿物占比相近。ZTR 指数均值为 0.28，但数值波动较大，反映远物源背景上有事件性的近物源注入。白钛石、电气石、锆石的高含量表明稳定矿物高度富集，经历了较强的化学风化，指示近源沉积特征。重晶石含量高（硬度低，稳定性差）反映近源快速堆积或热液活动的影响。该组合整体体现酸性物源特征，与彭灌物源区的基性物源组合差异显著。

**岩屑特征：**砂岩薄片鉴定显示，岩屑类型以粉



a—葛底坝剖面，沧浪铺组顶部潮汐沟道，发育槽状交错层理；b—葛底坝剖面，沧浪铺组上部板状—槽状交错层理，见逆粒序递变；c—磨刀垭剖面，沧浪铺组波痕；d—磨刀垭剖面，沧浪铺组下部粉砂岩，发育槽状交错层理；e—三堆剖面，沧浪铺组细砂岩，见多种交错层理；f—三堆剖面，沧浪铺组砾石，示最大扁平面；g—陈家坝剖面，筇竹寺组顶部波痕；h—双汇剖面，沧浪铺组上部粉—细砂岩，发育槽状交错层理；i—杨坝剖面，沧浪铺组上部波痕；j—杨坝剖面，沧浪铺组上部粉—细砂岩，发育槽状交错层理

图 5 川北及川西北地区寒武系沧浪铺组典型沉积构造

Fig. 5 Typical sedimentary structures of the Cambrian Canglangpu Formation in northern and northwestern Sichuan Basin

砂岩岩屑、硅质岩岩屑及变质岩岩屑为主，未见基性火山岩岩屑。碎屑颗粒分选中等至差，形态为次棱角状—次圆状，反映搬运距离较短、水动力条件变化较大的沉积环境。

锆石 CL 图像特征：锆石阴极发光图像呈现显著的混合型特征(图 4-e, 4-f)，部分锆石具有清晰的振荡环带，指示岩浆成因；另有部分锆石内部结构浑浊、环带模糊或消失，反映经历了变质作用

的改造(吴元保和郑永飞, 2004)。这种岩浆锆石与变质锆石共存的现象，明确指示物源区母岩为岩浆岩与变质岩的混合组合。

古水流方向：野外古水流标志测量显示(图 5-h, 5-i, 5-j; 图 6)，波痕走向主体为 E→W 向至 NE→SW 向，斜层理优势倾向近 S 方向。综合判断古水流方向为自 N 向 S 流动，物源区位于研究区北部，与汉南地块的空间位置吻合。

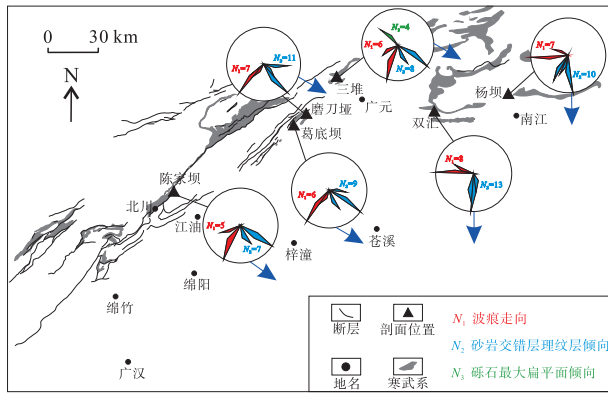


图 6 川北及川西北地区寒武系沧浪铺组古水流方向玫瑰图  
Fig. 6 Rose diagram of palaeocurrent directions of the Cambrian Canglangpu Formation in northern and northwestern Sichuan Basin

综上，汉南物源区母岩为酸性岩浆岩与变质岩的混合组合及沉积硅质岩，重矿物组合以重晶石+白钛石+电气石+锆石为特征，锆石 CL 图像兼具岩浆与变质成因类型，供源方向为 N→S。

## 4 沉积响应特征

### 4.1 沉积相类型与识别标志

综合川西北及川北地区 6 条露头剖面及区域钻井资料，在研究区下寒武统筇竹寺组—沧浪铺组识别出冲积扇、扇三角洲、滨岸、潮坪、陆棚、碳酸盐岩台地、台地边缘、斜坡、盆地等 9 种沉积相及若干亚相（李皎和何登发，2014；李亚丁等，2021；马石玉等，2021；邢倩等，2025）。各沉积相的岩石类型、识别标志及典型分布层位见表 2。

选取川西北陈家坝、葛底坝、磨刀垭、三堆剖面及川北双汇、杨坝剖面，编制了自西向东横跨绵阳—长宁裂陷槽的下寒武统筇竹寺组—沧浪铺组剖面沉积相对比图(图 7；剖面位置见图 1)。

### 4.2 川西北地区沉积序列

陈家坝剖面筇竹寺组中下部为深水陆棚与浅水陆棚相交替沉积，岩性以暗色泥页岩、粉砂质泥岩为主，反映该时期物源区尚未形成、陆源碎屑供给有限。筇竹寺组沉积晚期（第二段）发育厚层粉砂岩，基本上已由浅水陆棚过渡为滨岸相，反映该时期彭灌物源区已初具雏形，但仍处于水下古隆起阶段。沧浪铺组下部为滨岸相细砂岩，上部过渡为扇三角洲相含砾岩屑粗砂岩，岩屑中玄武岩岩屑含量显著增加。该沉积序列表明，陈家坝剖面在沧浪铺组沉积期碎屑供给明显增强，且碎屑组分中出现大量基性火山岩岩屑，指示近源存在基性火山岩物源的输入。

葛底坝剖面筇竹寺组主要发育深水—浅水陆棚相粉砂岩、泥岩。沧浪铺组为扇三角洲相含砾砂岩，碎屑粒度明显增粗，反映摩天岭物源区持续供源背景下供给增强。

磨刀垭剖面沉积序列对物源演化响应最为敏锐。筇竹寺组下部（第一<sub>1</sub>亚段）为浅水陆棚相，中部（第一<sub>2</sub>亚段）过渡为滨岸相，上部（第二段）即出现扇三角洲相沉积，与彭灌物源区第二段水下隆起形成时间吻合。沧浪铺组整体为扇三角洲相，向上粒度增粗。

三堆剖面仅出露筇竹寺组上部浅水陆棚—滨岸相粉砂岩，至沧浪铺组迅速过渡为细砂岩、粗砂岩及厚层砾岩，砾石叠瓦状构造指示 NW→SE 古水流方向，反映沧浪铺期物源区强烈隆升、粗碎屑快速进积。

### 4.3 川北地区沉积序列

双汇剖面与杨坝剖面沉积序列相似，呈典型三段式结构。与裂陷槽西侧各剖面相比，川北地区筇竹寺组厚度明显减薄，下部第一<sub>1</sub>亚段普遍缺失，

表 2 川北及川西北地区沉积相划分方案

Table 2 Sedimentary facies division scheme for northern and northwestern Sichuan Basin

| 沉积相    | 主要岩石类型       | 识别标志                  | 典型剖面、钻井,及其层位          |                    |
|--------|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 冲积扇    | 砾岩、砂质砾岩      | 砾石杂乱堆积,磨圆分选差,局部叠瓦状构造  | 三堆剖面(沧浪铺组)            |                    |
| 滨岸     | 粉砂岩、细砂岩      | 板状及槽状交错层理、浪成波痕、生物扰动   | 陈家坝剖面(沧浪铺组)           |                    |
| 扇三角洲   | 含砾砂岩、岩屑砂岩、砾岩 | 粒序层理、冲刷面、槽状交错层理、叠瓦状砾石 | 磨刀垭剖面(沧浪铺组),双汇剖面(沧二段) |                    |
| 陆棚     | 浅水陆棚         | 粉砂岩、泥岩、页岩             | 水平层理、波状层理、小型交错层理,砂泥互层 | 葛底坝、陈家坝、杨坝剖面(筇竹寺组) |
|        | 深水陆棚         | 泥页岩、硅质泥岩              | 水平层理,黄铁矿发育,碳质含量高      | 陈家坝剖面(筇竹寺组下部)      |
| 碳酸盐岩台地 | 鲕粒灰岩、生屑灰岩    | 块状层理、交错层理,鲕粒发育        | 杨坝、双汇剖面(沧一段/仙女洞组)     |                    |

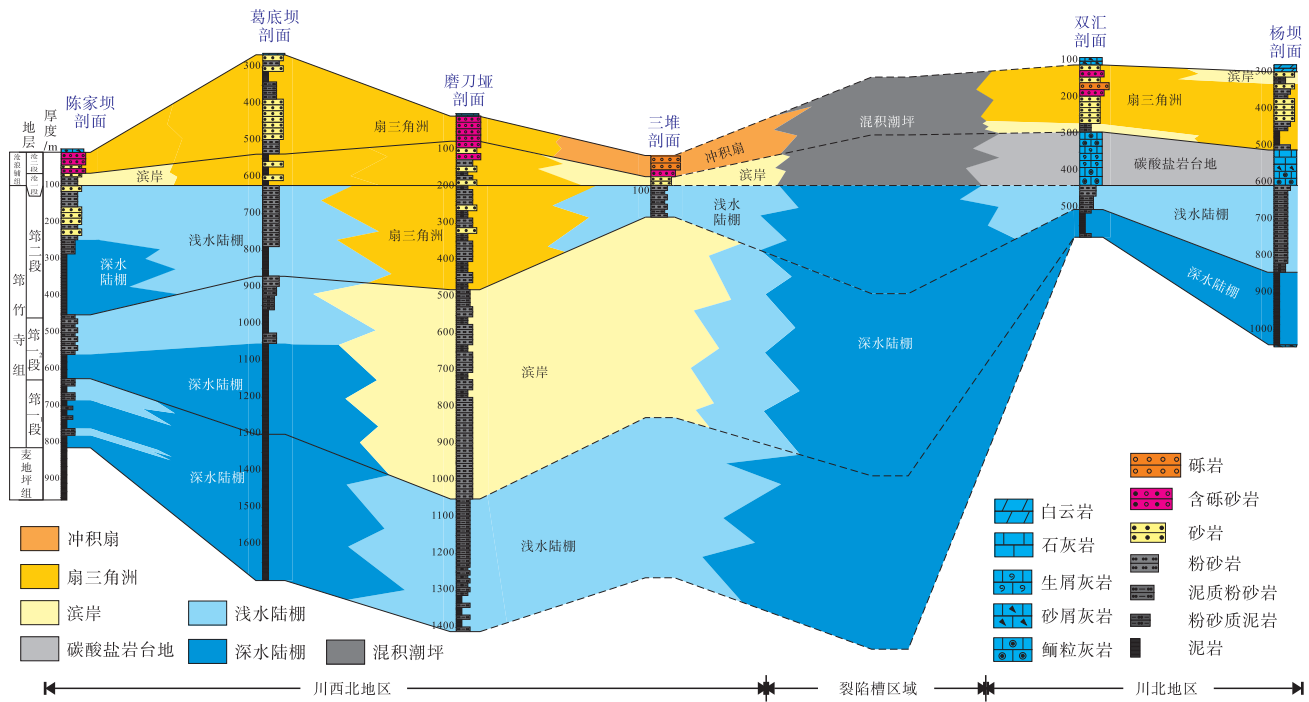


图 7 川北及川西北地区典型野外露头下寒武统沉积相对比剖面

Fig. 7 Sedimentary facies correlation cross-section of the Lower Cambrian at typical field outcrops in northern and northwestern Sichuan Basin

仅发育第一<sub>2</sub>亚段深水陆棚相及第二段浅水陆棚相沉积,反映汉南物源区此时为水下隆起、供源较弱。沧一段(仙女洞组)突变为鲕粒灰岩,属碳酸盐岩开阔台地相,指示陆源供给中断,与汉南物源区淹没事件吻合。沧二段(阎王碛组)发育扇三角洲相岩屑砂岩及厚层砾岩,砾石分选差、呈次棱角状,反映汉南古陆暴露后近源快速堆积。

#### 4.4 沉积差异与物源响应

连井剖面对比揭示,川西北地区筇竹寺组呈现深水陆棚→浅水陆棚→滨岸→扇三角洲的进积序列,沧浪铺组以扇三角洲相为主,反映摩天岭与彭灌双物源持续供源、强度不断增大。其中磨刀垭剖面第二段扇三角洲出现、陈家坝剖面玄武岩岩屑富集,分别对应彭灌物源区水下隆起形成与火山岛弧暴露 2 个关键节点。

川北地区呈现筇竹寺组细碎屑岩→沧一段鲕粒灰岩→沧二段粗碎屑岩的三段式序列,与汉南物源区“水下隆起→淹没沉寂→暴露供源”的阶段演化高度耦合。沧一段鲕粒灰岩是淹没事件的直接响应,沧二段厚层砾岩标志着汉南古陆暴露与大规模供源。

上述差异表明,川西北持续进积与川北阶段性突变 2 种沉积模式,是不同物源体系供源方式差异在盆地沉积记录中的具体体现。

## 5 讨论

### 5.1 彭灌物源区火山岛弧属性的物源证据

彭灌物源区火山岛弧属性的识别,建立在多重物源证据的相互印证之上。从岩屑组分看,北川陈家坝剖面沧浪铺组砂岩中玄武岩岩屑占比较高,颗粒呈次棱角状、分选中等至差(图 3-d),指示近源基性火山岩的快速剥蚀与堆积,这是判别火山岛弧物源最直接、最具鉴别意义的标志。从重矿物组合看,白钛石(28.41%)和赤褐铁矿(22.05%)的富集(图 2),与基性火山岩中钛铁矿蚀变及含铁矿物氧化的产物特征一致,与摩天岭物源区黄铁矿—电气石组合和汉南物源区重晶石—白钛石组合形成显著差异,为 3 大物源区的划分提供了定量依据。从锆石 CL 图像看,清晰的岩浆振荡环带和棱角状形态,指示岩浆成因且搬运距离有限,与近源火山岩物源属性吻合。从古水流方向看,波痕走向 NE→SW、斜层理倾向 SE(图 5-g;图 6),指示

物源来自 NW 方向, 与彭灌物源区的空间位置一致。

上述多方法物源示踪结果相互印证, 共同指示彭灌物源区为近源基性火山岩物源。该物源区的演化具有明显阶段性: 筇竹寺期为水下隆起, 供源能力有限; 沧浪铺期演化为暴露的火山岛弧, 开始大量提供基性火山岩碎屑。这一由水下隆起向暴露岛弧的转变过程, 是该物源区区别于摩天岭和汉南物源区的最重要特征。

彭灌物源区与摩天岭物源区在空间上均位于研究区西北部, 供源方向均为 NW→SE, 但母岩性质截然不同, 摩天岭以酸性岩浆岩为主, 彭灌以基性火山岩为主。二者在沧浪铺期同时供源, 构成双物源叠加的供给格局。这一物源组合特征决定了川西北地区沧浪铺组碎屑成分的复杂性, 岩屑砂岩中既可见变质岩屑 (摩天岭来源), 也富含玄武岩屑 (彭灌来源), 碎屑组分的双重性是川西北区别于川北的重要物源特征。

## 5.2 汉南物源区阶段性演化及其沉积响应

汉南物源区最显著的特征是其“水下隆起→淹没沉寂→暴露供源”的阶段性演化, 这一演化历程在川北地区留下了完整的 3 阶段式沉积记录 (图 7), 是物源控制沉积的最典型例证。

筇竹寺组沉积期, 杨坝剖面、双汇剖面以陆棚相粉砂岩、泥岩为主, 碎屑粒度细, 砂岩夹层少而薄。重矿物含量低, 岩屑类型单一, 反映汉南地区处于水下隆起状态, 供源能力有限, 仅能提供少量细粒碎屑。此阶段沉积面貌与川西北同期沉积差异不大, 均以细粒陆源碎屑为主。

沧一段沉积期, 川北地区岩性突变为鲕粒灰岩, 指示高能清水沉积环境, 表明陆源碎屑供给中断。这一物源沉寂事件标志着汉南物源区由水下隆起转变为碳酸盐岩台地, 不再受碎屑物质影响。这与同时期的川西北存在显著差异。

沧二段沉积期, 川北地区岩性突变为岩屑砂岩与砾岩, 构成向上变粗的沉积序列。碎屑粒度粗、分选差, 粒序层理和冲刷面发育, 反映近源快速堆积。重矿物组合以重晶石和白钛石为主, 电气石和锆石含量较高 (图 2), 反映远物源背景上有事件性的近物源注入; 锆石 CL 图像兼具岩浆环带与变质浑浊特征 (图 4-e, 4-f), 指示酸性岩浆岩与变质

岩混合母岩; 古水流方向为 N→S (图 5-h, 5-i, 5-j), 与汉南物源区供源方向一致。上述物源证据共同证实, 沧二段粗碎屑岩的物源来自汉南地区。这一粗碎屑事件标志着汉南物源区由淹没状态转变为暴露剥蚀状态, 并开始大规模供源。

综上, 川北地区筇竹寺组细碎屑岩→沧一段鲕粒灰岩→沧二段粗碎屑岩的 3 阶段式沉积序列, 与汉南物源区水下隆起 (弱供源) →淹没沉寂 (供源中断) →暴露剥蚀 (强供源) 的阶段性演化呈一一对应关系。这种沉积序列与物源演化的高度耦合, 为物源分析结论提供了来自盆地沉积记录的独立验证。

## 5.3 川西北与川北物源-沉积体系差异

川西北与川北沧浪铺期沉积特征差异显著, 其根源在于二者分属不同的物源体系控制。

川西北地区受摩天岭与彭灌双物源共同控制。摩天岭物源区自筇竹寺期开始供源, 母岩以酸性岩浆岩和沉积硅质岩为主; 彭灌物源区于沧浪铺期加入供源, 母岩以基性火山岩为主。二者供源方向均为 NW→SE, 双物源叠加使川西北地区陆源碎屑供给从未中断。因此, 川西北沧浪铺组以碎屑岩为主, 无明显二分性, 不发育碳酸盐沉积。沉积序列表现为由筇竹寺组陆棚相细碎屑岩向沧浪铺组滨岸一扇三角洲相碎屑岩过渡, 碎屑粒度逐渐增粗, 反映物源供给逐渐增强的趋势。

川北地区受汉南单物源控制, 且该物源区的供源具有明显的阶段性。筇竹寺期汉南为水下隆起, 供源微弱; 沧一段期被淹没, 供源中断; 沧二段期暴露剥蚀, 供源骤增。这一阶段性供源特征导致川北沧浪铺组二分性显著: 沧一段因供源中断发育碳酸盐岩台地, 沧二段因供源恢复发育扇三角洲粗碎屑沉积。川北地区沉积序列表现为细碎屑岩→碳酸盐岩→粗碎屑岩的 3 阶段式结构, 与物源区演化阶段一一对应。

上述对比表明, 物源区的数量、母岩性质及供源持续性, 直接决定了盆地内部的沉积面貌。持续供源形成连续碎屑充填, 阶段性供源形成碎屑—碳酸盐—碎屑的旋回式沉积, 多物源叠加则造成碎屑组分的复杂化。川西北与川北的沉积分异, 本质上是不同物源体系供源方式差异在沉积记录中的体现。

### 5.4 物源-沉积耦合模式及指示意义

综合物源分析与沉积响应，研究区早寒武世物源-沉积耦合可概括为 3 阶段演化模式。

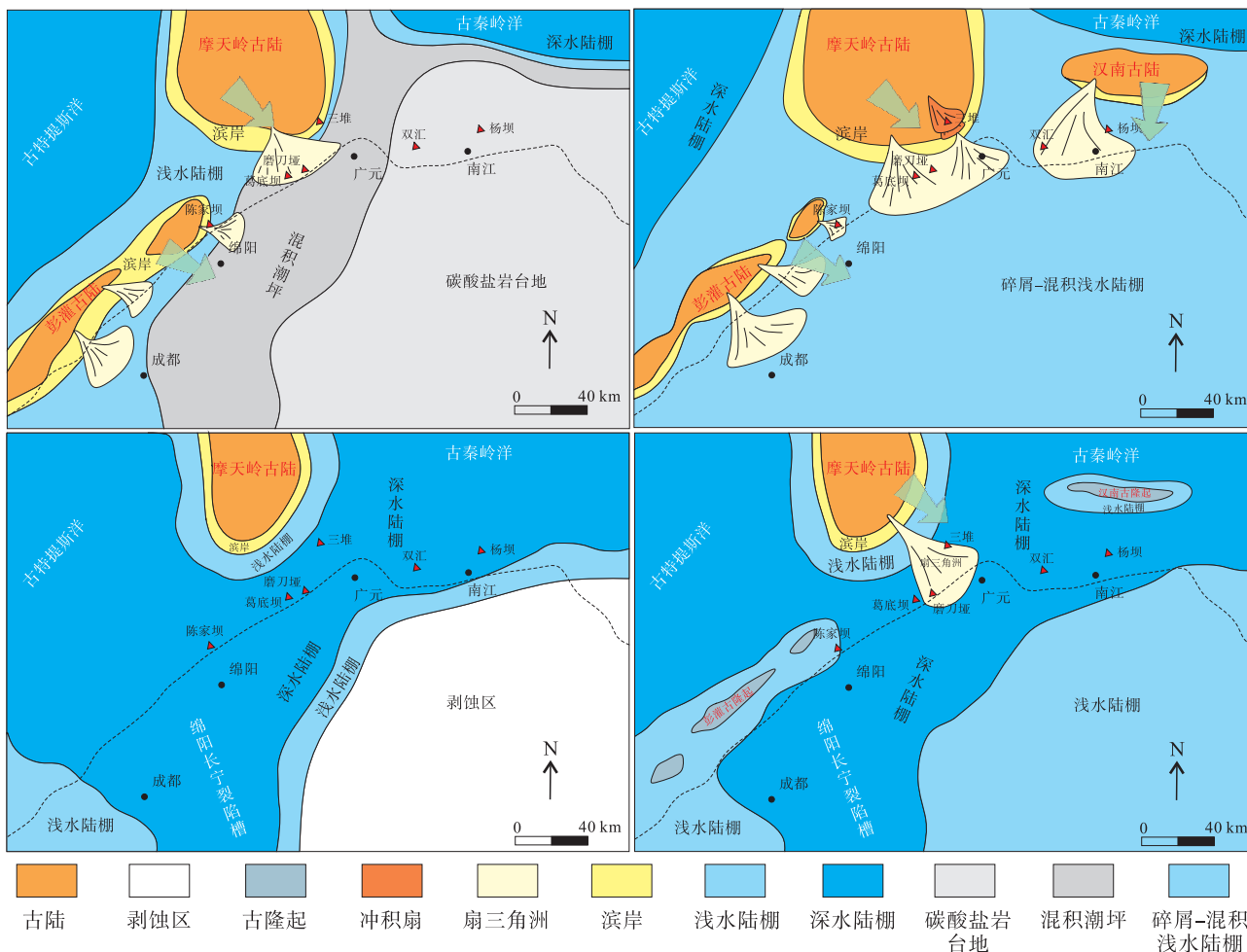
筇竹寺期，物源供给呈现递进演化特征。第一段沉积期，摩天岭物源区为唯一供源区，供源方向 NW→SE，供源强度较弱，裂隙槽内为深水陆棚相沉积，两侧为浅水陆棚相沉积(图 8-a)。至第二段沉积期，彭灌地区开始出现水下隆起，与摩天岭物源区共同供源，川西北地区碎屑供给增强，开始出现扇三角洲沉积(图 8-b)。该时期川中地区为碳酸盐岩剥蚀区，未提供物源供给。

沧一段沉积期，摩天岭持续供源，彭灌火山岛弧开始暴露供源，汉南淹没、供源中断。川西北受双物源控制，持续发育碎屑滨岸-扇三角洲沉积；川北因供源中断，转变为碳酸盐岩台地沉积。古地

理呈现“西碎东清”的分异格局，物源供给区域差异直接控制了沉积相的东西分异(图 8-c)。

沧二段沉积期，三大物源区全部暴露并同时供源，盆地碎屑供给达到鼎盛。川西北受摩天岭(酸性岩浆岩)与彭灌(基性火山岩)双物源控制，川北受汉南(酸性岩浆岩+变质岩)物源控制，扇三角洲粗碎屑自 NW 和 N 2 个方向向盆地进积，构成多物源汇聚的沉积格局(图 8-d)。

上述物源-沉积耦合模式表明，物源区的形成时间、演化阶段与供源强度的时空变化，是控制盆地沉积充填的核心因素。本研究建立的“3 大物源区—2 套沉积域—3 阶段演化”的源汇框架，可为四川盆地早寒武世岩相古地理重建提供物源约束。沧一段鲕粒灰岩作为汉南物源区淹没事件的标志层，沧二段粗碎屑岩作为汉南物源区暴露供源的产物，可作为区域地层对比和物源体系识别的关键沉积标志。



a—第一段沉积期；b—第二段沉积期；c—沧一段沉积期；d—沧二段沉积期；图中黑色虚线为四川盆地边界线

图 8 川北及川西北地区早寒武世沉积古地理及物源分布

Fig. 8 Sedimentary palaeogeography and provenance distribution of the Early Cambrian in northern and northwestern Sichuan Basin

## 6 结论

1) 川西北及川北地区早寒武世存在摩天岭、彭灌、汉南3大物源区。摩天岭物源区形成最早,母岩为酸性岩浆岩及沉积硅质岩,自筇竹寺组沉积早期至沧浪铺期持续供源;彭灌物源区于第二段始现水下隆起,提供NW至SE的物源供给,沧浪铺期演化为火山岛弧,母岩为基性火山岩,提供NW至SE的物源供给;汉南物源区母岩为酸性岩浆岩与变质岩混合,呈阶段性演化,提供由N向S的物源供给。

2) 川西北地区在筇竹寺组沉积期主要受摩天岭物源区影响,沉积了浅水陆棚相细碎屑岩;进入沧浪铺组沉积期,随着彭灌火山岛弧暴露,转为受摩天岭与彭灌双物源共同控制,陆源碎屑供给增强,沧浪铺组以碎屑岩为主,无明显二分性,缺乏碳酸盐沉积。玄武岩岩屑的富集是彭灌物源区沧浪铺期供源的直接证据。

3) 汉南物源区“水下隆起→淹没沉寂→暴露供源”的阶段性演化,导致川北地区呈现筇竹寺组细碎屑岩→沧一段鲕粒灰岩→沧二段粗碎屑岩的三段式沉积序列,沧一段鲕粒灰岩和沧二段粗碎屑岩分别为淹没与暴露事件的标志性沉积响应。

4) 沧浪铺组沉积晚期3大物源区全部暴露并同时供源,川西北持续碎屑充填与川北3阶段式沉积响应的差异,根源在于物源体系供源方式的不同。本研究建立的“3大物源区—2套沉积域—3阶段演化”源汇框架,为区域古地理重建提供了物源约束。

**致谢** 感谢中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司在野外工作和资料使用方面的大力支持。感谢审稿专家对文稿提出建设性修改完善建议。

### 参考文献 (References)

邓豪爽,宋金民,刘树根,李智武,田立洲,杨迪,叶玥豪,金鑫,王斌,马小刚,薛佳敏,张祖兵,杨绍海,罗平. 2024. 川中—川北地区下寒武统沧浪铺组一段沉积模式. 成都理工大学学报(自然科学版),53(2): 334-351. [Deng H S, Song J M, Liu S G, Li Z W, Tian L Z, Yang D, Ye Y H, Jin X, Wang B, Ma X G, Xue J M, Zhang Z B, Yang S H, Luo P. 2024. Sedimentary models of the first member of the Lower Cambrian Canglangpu Formation in the central to northern Sichuan Basin. *Journal of Chengdu University of Technology*

(Science & Technology Edition),53(2): 334-351]

杜远生. 2018. 关于古流分析的讨论. 古地理学报,20(5): 925-926.

[Du Y S. 2018. Discussion on palaeocurrent analysis. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition),20(5): 925-926]

段金宝,梅庆华,李毕松,梁子锐. 2019. 四川盆地震旦纪—早寒武世构造-沉积演化过程. 地球科学,44(3): 738-755. [Duan J B, Mei Q H, Li B S, Liang Z R. 2019. Sinian-Early Cambrian tectonic-sedimentary evolution in Sichuan Basin. *Earth Science*,44(3): 738-755]

范海经,邓虎成,伏美燕,刘四兵,余翰泽,李依林. 2021. 四川盆地寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应. 沉积学报,39(4): 1004-1019. [Fan H J, Deng H C, Fu M Y, Liu S B, Yu H Z, Li Y L. 2021. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its response to construction. *Acta Sedimentologica Sinica*,39(4): 1004-1019]

符芳亮,潘松圻,张国生,赵正福,王伟,沈雅婷,荆振华. 2025. 黑色页岩中的黄铁矿形态特征组合及古环境意义:以四川盆地W207井下寒武统筇竹寺组为例. 沉积学报,43(4): 1522-1534. [Fu F L, Pan S Q, Zhang G S, Zhao Z F, Wang W, Shen Y T, Jing Z H. 2025. Assemblage of morphological characteristics in pyrites and their paleoenvironmental significance in black shale: a case study from the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation of well W207 in the Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*,43(4): 1522-1534]

谷志东,殷积峰,姜华,张宝民,李秋芬,袁苗,翟秀芬,张黎,杨帆. 2016. 四川盆地西北部晚震旦世—早古生代构造演化与天然气勘探. 石油勘探与开发,43(1): 1-11. [Gu Z D, Yin J F, Jiang H, Zhang B M, Li Q F, Yuan M, Zhai X F, Zhang L, Yang F. 2016. Tectonic evolution from Late Sinian to Early Paleozoic and natural gas exploration in northwestern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*,43(1): 1-11]

何登发,李德生,张国伟,赵路子,樊春,鲁人齐,文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学,46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geology*,46(3): 589-606]

黄博宇. 2018. 四川盆地震旦纪—早寒武世岩相古地理与裂陷槽演化. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Huang B Y. 2018. Sinian-Early Cambrian lithofacies palaeogeography and rift trough evolution of the Sichuan Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing)]

李红,李飞,龚娇林,曾楷,邓嘉婷,王浩铮,苏成鹏. 2021. 混积岩中重矿物形貌学特征及物源意义:以川北寒武系第二统仙女洞组为例. 沉积学报,39(3): 525-539. [Li H, Li F, Gong Q L, Zeng K, Deng J T, Wang H Z, Su C P. 2021. Morphological characteristics and provenance significance of heavy minerals in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentation: a case study from the Xiannüdong Formation, Cambrian(Series 2), northern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*,39(3): 525-539]

李皎,何登发. 2014. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造-沉积环境演化. 古地理学报,16(4): 441-460. [Li J, He D F. 2014.

- Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(4): 441-460]
- 李伟, 余华琪, 邓鸿斌. 2012. 四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征. *石油勘探与开发*, 39(6): 681-690. [Li W, Yu H Q, Deng H B. 2012. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 681-690]
- 李亚丁, 陈友莲, 严威, 代瑞雪, 郗诚, 和源. 2021. 四川盆地寒武系沧浪铺组沉积演化特征. *天然气地球科学*, 32(9): 1334-1346. [Li Y D, Chen Y L, Yan W, Dai R X, Xi C, He Y. 2021. Research on sedimentary evolution characteristics of Cambrian Canglangpu Formation, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(9): 1334-1346]
- 李永成, 惠博, 董云鹏, 孙圣思, 何登峰, 臧儒韬, 闫树萱. 2025. 扬子西缘新元古界黄水河群碎屑锆石年代学特征及其对罗迪尼亚超大陆重建的启示. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 52(3): 440-455. [Li Y C, Hui B, Dong Y P, Sun S S, He D F, Zang R T, Yan S X. 2025. Detrital zircon geochronology of the Neoproterozoic Huangshuihe Group in the western Yangtze Block, and its implications for the reconstruction of the Rodinia Supercontinent. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 52(3): 440-455]
- 刘树根, 王世玉, 孙玮, 冉波, 杨迪, 罗超, 叶玥豪, 白志强, 邱嘉文, 张旋. 2013. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(6): 621-639. [Liu S G, Wang S Y, Sun W, Ran B, Yang D, Luo C, Ye Y H, Bai Z Q, Qiu J W, Zhang X. 2013. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi in Sichuan Basin and its peripheral areas. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(6): 621-639]
- 马石玉, 谢武仁, 杨威, 段书府, 汪泽成, 武赛军, 苏楠, 郝翠果, 王小丹. 2021. 四川盆地及其周缘下寒武统沧浪铺组下段岩相古地理特征. *天然气地球科学*, 32(9): 1324-1333. [Ma S Y, Xie W R, Yang W, Duan S F, Wang Z C, Wu S J, Su N, Hao C G, Wang X D. 2021. Lithofacies and paleogeography of the lower Canglangpu Formation of the lower Cambrian in Sichuan Basin and its periphery. *Natural Gas Geoscience*, 32(9): 1324-1333]
- 汪泽成, 姜华, 王铜山, 鲁卫华, 谷志东, 徐安娜, 杨雨, 徐兆辉. 2014. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义. *石油勘探与开发*, 41(3): 305-312. [Wang Z C, Jiang H, Wang T S, Lu W H, Gu Z D, Xu A N, Yang Y, Xu Z H. 2014. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 305-312]
- 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 徐春春, 邹才能, 谢武仁, 曾富英, 武赛军. 2015. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征. *天然气工业*, 35(1): 24-35. [Wei G Q, Yang W, Du J H, Xu C C, Zou C N, Xie W R, Zang F Y, Wu S J. 2015. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 24-35]
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589-1604. [Wu Y B, Zheng Y F. 2004. Genetic Mineralogy of zircons and its constraints on the interpretation of U-Pb ages. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604]
- 邢风存, 侯明才, 林良彪, 徐胜林, 胡华蕊. 2015. 四川盆地晚震旦世—早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论. *地学前缘*, 22(1): 115-125. [Xing F C, Hou M C, Lin L B, Xu S L, Hu H R. 2015. The records and its dynamic genesis discussion of tectonic movement during the Late Sinian and the Early Cambrian of Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 115-125]
- 邢倩, 李杨凡, 李翔, 万子千, 李雅兰. 2025. 川北米仓山地区寒武系仙女洞组碳酸盐岩储集特征及主控因素. *岩性油气藏*, 37(4): 50-62. [Xing Q, Li Y F, Li X, Wan Z Q, Li Y L. 2025. Carbonate reservoir characteristics and main controlling factors of the Cambrian Xianfengdong Formation in the Micangshan area, northern Sichuan. *Lithologic Reservoirs*, 37(4): 50-62]
- 严威, 钟原, 周刚, 陈友莲, 和源, 王文之, 李亚丁, 陈曦, 郗诚. 2020. 四川盆地寒武统沧浪铺组岩相古地理特征及对储层发育的控制作用. *天然气勘探与开发*, 43(4): 22-32. [Yan W, Zhong Y, Zhou G, Chen Y L, He Y, Wang W Z, Li Y D, Chen X, Xi C. 2020. Lithofacies paleogeography features of the lower Cambrian Canglangpu Formation in Sichuan Basin and their control on reservoir development. *Natural Gas Exploration and Development*, 43(4): 22-32]
- 杨雨然, 石学文, 李彦佑, 何一凡, 朱逸青, 张入化, 徐亮, 杨雪, 杨一茗, 张亦弛. 2024. 四川德阳—安岳裂陷槽筇竹寺组古地貌、沉积模式与勘探方向. *中国石油勘探*, 29(6): 67-81. [Yang Y R, Shi X W, Li Y Y, He Y F, Zhu Y Q, Zhang R H, Xu L, Yang X, Yang Y M, Zhang Y C. 2024. Paleogeomorphology, sedimentary pattern and exploration orientation of Qiongzhusi Formation in Deyang-Anyue Rift Trough, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(6): 67-81]
- 张满郎, 谢增业, 李熙喆, 谷江锐, 杨威, 刘满仓. 2010. 四川盆地寒武纪岩相古地理特征. *沉积学报*, 28(1): 128-139. [Zhang M L, Xie Z Y, Li X Z, Gu J R, Yang W, Liu M C. 2010. Characteristics of lithofacies paleogeography of Cambrian in Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(1): 128-139]
- 张亚, 李勇, 陈骁, 李成龙, 龙虹宇, 刘冉, 钱红杉, 侯乾, 黄茂轩, 王启宇, 陈曦, 向柱. 2023. 川西北部地区寒武系—奥陶系的地层格架新认识及地质意义. *天然气勘探与开发*, 46(3): 14-24. [Zhang Y, Li Y, Chen X, Li C L, Long H Y, Liu R, Qian H S, Hou Q, Huang M X, Wang Q Y, Chen X, Xiang Z. 2023. New understanding and geological significance of Cambrian-Ordovician stratigraphic framework in northwestern Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(3): 14-24]
- 张英利, 贾晓彤, 王宗起, 陈木银. 2018. 米仓山地区早寒武世仙女洞组沉积物源新认识: 沉积学、重矿物和碎屑锆石年代学的证据.

- 地质学报, 92(9): 1918-1935. [Zhang Y L, Jia X T, Wang Z Q, Chen M Y. 2018. New insights into provenance of Early Cambrian Xiannüdong Formation in the Micangshan area: evidence from sedimentology, heavy mineral and detrital zirconochronology. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1918-1935]
- 张英利, 贾晓彤, 王宗起, 王坤明, 陈木银. 2019. 米仓山地区早寒武世仙女洞组古地理和沉积物源分析. *地质学报*, 93(11): 2904-2920. [Zhang Y L, Jia X T, Wang Z Q, Wang K M, Chen M Y. 2019. Palaeogeography and provenance analysis of Early Cambrian Xiannüdong Formation in the Micangshan area. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2904-2920]
- 张宇航, 汤良杰, 云露, 谢大庆, 邱海峻, 蒋华山. 2012. 塔里木盆地关键构造变革期不整合特征及其地质意义. *世界地质*, 31(2): 306-314. [Zhang Y H, Tang L J, Yun L, Xie D Q, Qiu H J, Jiang H S. 2012. Unconformity characteristics and geological significance in key tectonic revolution stage of Tarim Basin. *Global Geology*, 31(2): 306-314]
- 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. [Zhao H G, Liu C Y. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 409-415]
- 郑马嘉, 施振生, 李熙喆, 张晓伟, 赵群, 操旭, 武瑾, 陈渝川, 王龙熠, 周天琪, 汪鹏飞. 2026. 上扬子地区早寒武世麦地坪组一筇竹寺组沉积相模式及其构造—海平面耦合响应. *石油与天然气地质*, 1-20[2026-04-28]. [Zheng M J, Shi Z S, Li X Z, Zhang X W, Zhao Q, Cao X, Wu J, Chen Y C, Wang L Y, Zhou T Q, Wang P F. 2026. Sedimentary facies model of the Early Cambrian Maidiping-Qiongzhusi Formations and its responses to the coupling of tectonics and sea-level changes in the Upper Yangtze region. *Oil & Gas Geology*, 1-20[2026-04-28]]
- 周刚, 杨岱林, 孙奕婷, 严威, 张亚, 文华国, 和源, 刘四兵. 2024. 四川盆地及周缘寒武系沧浪铺组沉积充填过程及油气地质意义. *岩性油气藏*, 36(5): 25-34. [Zhou G, Yang D L, Sun Y T, Yan W, Zhang Y, Wen H G, He Y, Liu S B. 2024. Sedimentary filling process and petroleum geological significance of Cambrian Canglangpu Formation in Sichuan Basin and adjacent areas. *Lithologic Reservoirs*, 36(5): 25-34]
- 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 曾洪流, 姜在兴, 刘可禹. 2017. 陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展. *地球科学*, 42(11): 1851-1870. [Zhu H T, Xu C G, Zhu X M, Zeng H L, Jiang Z X, Liu K Y. 2017. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin. *Earth Science*, 42(11): 1851-1870]
- 朱淑玥, 刘磊, 虎建玲, 陈波, 王志伟, 史云鹤, 杜小伟, 王峰, 陈洪德, 张成弓, 付斯一, 张靖芪. 2023. 鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组源—汇系统特征及古地理格局. *沉积学报*, 41(5): 1430-1450. [Zhu S Y, Liu L, Hu J L, Chen B, Wang Z W, Shi Y H, Du X W, Wang F, Chen H D, Zhang C G, Fu S Y, Zhang J Q. 2023. Characteristics of the source-to-sink system and paleogeographical pattern from the Upper Carboniferous Yanghugou Formation in western margin of the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1430-1450]
- Blatt H, Tuten M W. 1981. Detrital quartz as an indicator of distance from shore in marine mudrocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(4): 1259-1266.
- Gu Z, Jian X, Zhai X, Shen X, Ye S. 2025. Sedimentary records reveal an early Cambrian active margin setting in the NW Yangtze Block, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*: 113207.
- Han Y, Ran B, Santosh M, Liu S, Li Z, Ye Y, Lü F, Wang H, Li C. 2025. The Cambrian collision of the Yangtze Block with Gondwana: evidence from provenance analyses. *Geological Society of America Bulletin*, 137(1-2): 594-612.
- Haughton D W, Morton A C, Todd S P. 1991. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. London: Oxford University Press.
- Hubert J F. 1962. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 32(3): 440-450.
- Liu S G, Yang Y, Deng B, Zhang Y, Wen L, Sun W, Li Z W, Jansa L, Li J X, Song J M, Zhang X H, Peng H L. 2021. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China. *Earth-Science Reviews*, 213: 103470.
- Morton A C, Hallsworth C. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90(3-4): 241-256.
- Sun J P, Dong Y P. 2020. Stratigraphy and geochronology of Permo-Carboniferous strata in the western North China Craton: insights into the tectonic evolution of the southern Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 88: 201-219.
- Xu W Q, Yin H W, Jia D, Li C S, Wang W, Yang G X, He W H, Chen Z, Ren R. 2021. Structural features and evolution of the northwestern Sichuan Basin: insights from discrete numerical simulations. *Frontiers in Earth Science*: 9.

(责任编辑 郑秀娟)