



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507522

引用格式:王琳,罗伟,朱志军,等.滇西兰坪盆地始新统果郎组沉积地球化学特征及其地质意义[J].科学技术与工程,2026,26(27):11580-11596.

Wang Lin, Luo Wei, Zhu Zhijun, et al. Sedimentary geochemical characteristics and geological implications of the Eocene Guolang Formation in Lanping Basin, Western Yunnan[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11580-11596.

天文学、地球科学

滇西兰坪盆地始新统果郎组沉积地球化学特征及其地质意义

王琳¹, 罗伟², 朱志军^{1*}, 张治波³, 杨羿琳¹, 郭淑贤¹, 邹子航¹

(1. 东华理工大学地球与行星科学学院, 南昌 330013; 2. 云南省核工业地质调查院, 昆明 650100;

3. 伊犁师范大学资源与环境学院, 伊宁 835000)

摘 要 兰坪盆地作为“三江”成矿带的重要组成部分,盆地内许多矿床赋矿围岩都与始新统有关。为了明确盆地内始新统与矿床赋矿围岩的关联,进而为区域成矿研究及沉积演化分析提供基础支撑,以兰坪盆地始新统果郎组为研究对象,通过沉积学、矿物学、沉积地球化学等方法,研究了果郎组沉积物粒度特征、物源性质、构造背景及其沉积环境。结果显示:微量元素蛛网图中 Sc、V、Cr、Co、Ni、Th、U、Rb、Sr、Cs、Ba 均在不同样品中体现出富集和亏损的变化;稀土元素配分图有明显的“左陡右缓”的趋势;Sr/Ba、V/Ni 和 V/(V+Ni) 指示了含盐度低的干旱氧化环境;Zr-Th、La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10 判别图解反映其大陆岛弧的构造背景;La/Yb-REE、La/Th-Hf 图解说明其源岩性质为沉积岩,源区主要来自长英质源区,其次为长英质/基性岩物源混合区;概率累积曲线为“一跳一悬夹过渡”式,悬浮占主导地位;SK- σ 1 散点图以及 C-M 图解均证明了其为河湖相牵引流和低能重力流主导的沉积;由此可见,揭示兰坪盆地始新统果郎组沉积演化特征,明确其与区域矿床赋矿围岩的内在关联,能够为后续相关地层的深入探究和矿产资源勘探提供依据。

关键词 兰坪盆地;果郎组;地球化学特征;沉积地质意义

中图法分类号 P591;

文献标志码 A

Sedimentary Geochemical Characteristics and Geological Implications of the Eocene Guolang Formation in Lanping Basin, Western Yunnan

WANG Lin¹, LUO Wei², ZHU Zhi-jun^{1*}, ZHANG Zhi-bo³, YANG Yi-lin¹, GUO Shu-xian¹, ZOU Zi-hang¹

(1. School of Earth and Planetary Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Yunnan Institute of Nuclear Industry Geological Survey, Kunming 650100, China; 3. School of

Resources and Environment, Yili Normal University, Yining 835000, China)

[Abstract] As an important part of the “Sanjiang” metallogenic belt, the Lanping Basin contains numerous ore deposits whose host rocks are associated with the Eocene Series. In order to clarify the relationship between the Eocene and ore-bearing wall rocks in the basin, and to further provide basic support for regional metallogenic research and sedimentary evolution analysis, the Guolang Formation of the Eocene in Lanping Basin was taken as the research object, the sedimentology, mineralogy, and sedimentary geochemistry were adopted to investigate grain size characteristics, provenance properties, tectonic setting, and sedimentary environment. The results show that: trace element spider diagrams indicate that elements such as Sc, V, Cr, Co, Ni, Th, U, Rb, Sr, Cs, and Ba exhibit variations in enrichment and depletion across different samples; rare earth element (REE) distribution patterns display an obvious “steep left and gentle right” trend; ratios of Sr/Ba, V/Ni, and V/(V+Ni) suggest an arid, oxidizing environment with low salinity; discriminant diagrams including Zr-Th, La-Th-Sc, and Th-Sc-Zr/10 reflect a continental island arc tectonic setting; La/Yb-REE and La/Th-Hf diagrams illustrate that the source rocks are sedimentary rocks, with provenance mainly derived from felsic source areas, followed by mixed source areas of felsic/basic rocks; probability cumulative curves show a “one jump, one suspension with transition” pattern,

收稿日期: 2025-10-29 修订日期: 2026-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(42362018)

第一作者: 王琳(2002—),女,达斡尔族,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生。研究方向:沉积地质学。E-mail:1809395614@qq.com。

* 通信作者: 朱志军(1976—),男,汉族,安徽霍邱人,博士,教授。研究方向:沉积地质学,沉积矿产。E-mail:zhuzj013@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

dominated by suspension; both SK- $\sigma 1$ scatter plot and C-M diagram confirm that the sedimentation is dominated by fluvio-lacustrine traction current and low-energy gravity flow. It can be seen that the revelation of the sedimentary evolution characteristics of the Eocene Guolang Formation in the Lanping Basin and the clarification of its internal relationship with regional ore-bearing wall rocks can provide a reference for the in-depth exploration and mineral resources prospecting in the future.

[**Keywords**] Lanping Basin; Guolang Formation; geochemical characteristics; sedimentary geological significance

兰坪盆地发育于滇西古特提斯多岛洋构造格局之上,其形成与特提斯—三江造山带的构造演化紧密相关,是三江成矿带的重要组成部分^[1-2]。古近系始新统在该盆地的沉积充填过程中处于关键时段,对其开展深入研究,有助于解析盆地该时期的构造演化、古气候变迁以及物质来源等关键信息。前人针对兰坪盆地已经取得了一系列研究成果:王安建等^[3]在开展三江特提斯复合造山带研究时,明确了兰坪盆地在区域构造演化中的关键地位;张琪等^[4]通过探讨区域岩浆活动与构造的关系,揭示了兰坪盆地的形成与特提斯构造域复杂动力学过程的内在关联;朱志军等^[5]通过野外露头观测与室内测试分析,梳理了区内古近系的沉积环境、层序特征等内容,提出研究区古近系主要发育冲积扇、河流、三角洲和湖泊沉积环境,整体沉积建造对应一个完整的盆地演化旋回。然而,针对始新统果郎组粒度特征与地球化学特征的精细研究仍有待加强。在地球化学特征研究方向,虽已有部分学者对兰坪盆地古近系细碎屑岩开展稀土元素及微量元素分析,但针对始新统果郎组这一特定地层的系统性研究较少,且在地球化学特征与沉积环境的耦合关系研究领域仍存在一定空白。另一方面,沉积物粒度特征可以在一定程度上反映沉积过程的动力学信息^[6],其粒度特征与相关参数可为划分沉积环境、揭示碎屑物质运移方式、限定沉积岩形成时的水动力条件提供重要理论依据^[7],但这类研究在兰坪盆地始新统果郎组沉积岩研究中尚未得到充分重视,也缺乏系统分析。因此,以兰坪盆地始新统沉积岩为研究对象,通过分析样品的粒度特征和地球化学特征,判识其物源性质与大地构造背景,识别该时期盆地的沉积环境,最终为揭示陆内造山带-盆地系统的演化机制提供重要依据。

1 研究区概况

兰坪盆地地处欧亚板块、印度板块和特提斯三大构造域的交汇部位,属于特提斯-三江构造带^[8-9],大地构造上是环特提斯构造域的重要组成部分^[10]。如图1所示,其东邻金沙江—哀牢山断裂带,西接澜沧江断裂带,中部还有兰坪—思茅中轴断裂^[11-12]。该盆地在地质演化历史中经历了复杂的构造运动与沉积过程,众多学者对其构造演化进行了深入研

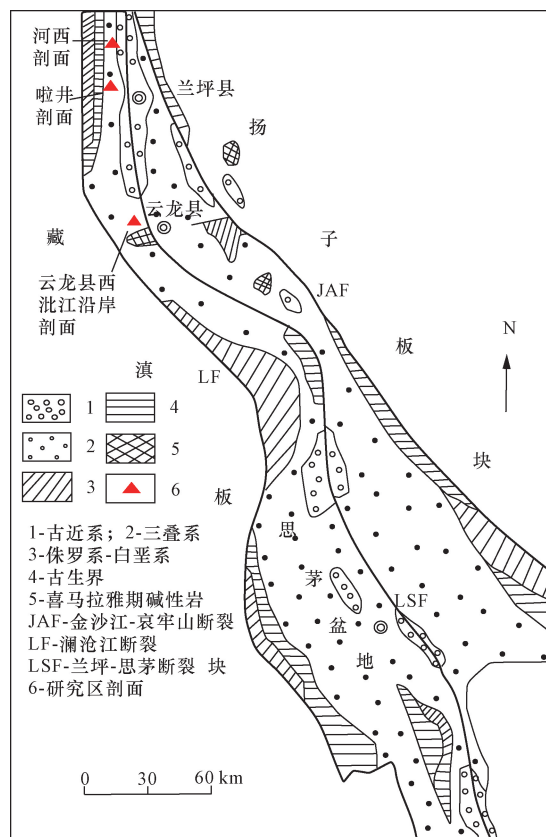


图1 云南兰坪盆地地质与构造略图^[12]

Fig. 1 Geological and tectonic map of Lanping Basin, Yunnan^[12]

究,牟传龙等^[13]指出兰坪中新世沉积盆地具有独特的演化过程。

兰坪盆地是中新生代盆地,其新生代沉积特征明显,与构造演化密切相关,古近系底部沉积与下伏白垩系呈不整合接触,总体为红色膏岩碎屑岩和膏岩建造^[14-15]。古近系较为发育,由老到新分别为云龙组(E_{1y})、果郎组(E_{2g})、宝相寺组(E_{2b})以及金丝厂组(E_{3j})^[16]。其中,云龙组为干旱气候下湖水蒸发、浓缩形成的盐湖沉积,作为主要的含盐层位,与下伏白垩系虎头寺组呈假整合接触。果郎组与下伏云龙组呈整合接触,与上覆宝相寺组呈不整合接触。主要岩性为紫红色细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩等。果郎组沉积时期,盆地整体上呈现出西陡东缓、西深东浅的构造格局,由下至上碎屑物粒度逐渐变粗,反映出水体逐渐变浅,湖盆逐渐萎缩的趋势。果郎组紫红色细碎屑岩(泥岩、粉

砂岩)是盆地内砂岩型铜矿(如高山阱铜矿)的“矿源层”——前人研究发现该地层中铜元素丰度较高,且后期构造活动(如断裂、褶皱)可促使矿质活化迁移而聚集成矿^[17-19]。宝相寺组为粗碎屑沉积,普遍发育冲刷充填和斜层理构造,主要为一套弱还原环境下的河湖相沉积^[20]。金丝厂组为一套红色巨砾岩夹砂泥岩,以剑川马平关出露最好,与下伏地层宝相寺组呈不整合接触。复杂的地质条件使得兰坪盆地矿产资源丰富,位于滇西兰坪盆地的金顶 Pb-Zn 超大型矿床,就是中新代沉积岩容矿的 Pb-Zn-Cu-Ag 贱金属矿床中的一种^[21-23]。

2 样品采集及分析

2.1 实测剖面及采样

兰坪盆地中新代地层整体出露情况良好,自侏罗纪开始沉积了大量的红色碎屑岩夹石膏层,在古近系地层中三角洲相对较发育^[5,21]。实测三条剖面位于兰坪盆地的北部、中部和南部,分别是河西剖面、啦井剖面以及云龙县西泔江沿岸剖面(图 1)。本次研究共采集果郎组样品 28 件,其中,河西剖面样品 10 件,啦井剖面样品 8 件,云龙县剖面样品 10

件。选取样品中最新鲜的部分磨制成岩石薄片并进行镜下矿物成分和粒度的分析,绘制剖面样品岩性及分布柱状图(图 2),发现果郎组样品主要为紫红色的细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩以及泥岩等,发育小型交错层理、楔状层理、波状层理、水平层理等多种沉积构造,宏观上有明显的砂泥岩互层特征,层面发育波痕、泥裂等层面构造。

2.2 实验及粒度计算方法

粒度分析方法包括直接测量法、筛析法、沉降法(动态和静态)、显微镜法、图像法、场干扰法(光学法和电学法)等^[24-26]。通过粒度参数的计算与提取可以反映沉积环境信息^[27]。首先计算出样品的 Φ 值(粒度标准换算参数),再通过福克和沃德的计算公式算出其他相关粒度参数,如 C 值(累积百分含量 1% 对应的颗粒直径)、 M 值(累积百分含量 50% 对应的颗粒直径)、平均粒径 M_z 、标准偏差 σ_1 、偏度 SK 以及峰度 KG 等。采用常见测量粒径的图像法,实验仪器为 Nikon,型号: Lv100NP,实验由东华理工大学测试完成。对样品进行镜下粒度分析时,要保证每件样品测量的颗粒数量不少于 300 个,并将所测粒径 D 至少保留到小数点后五位,以确保

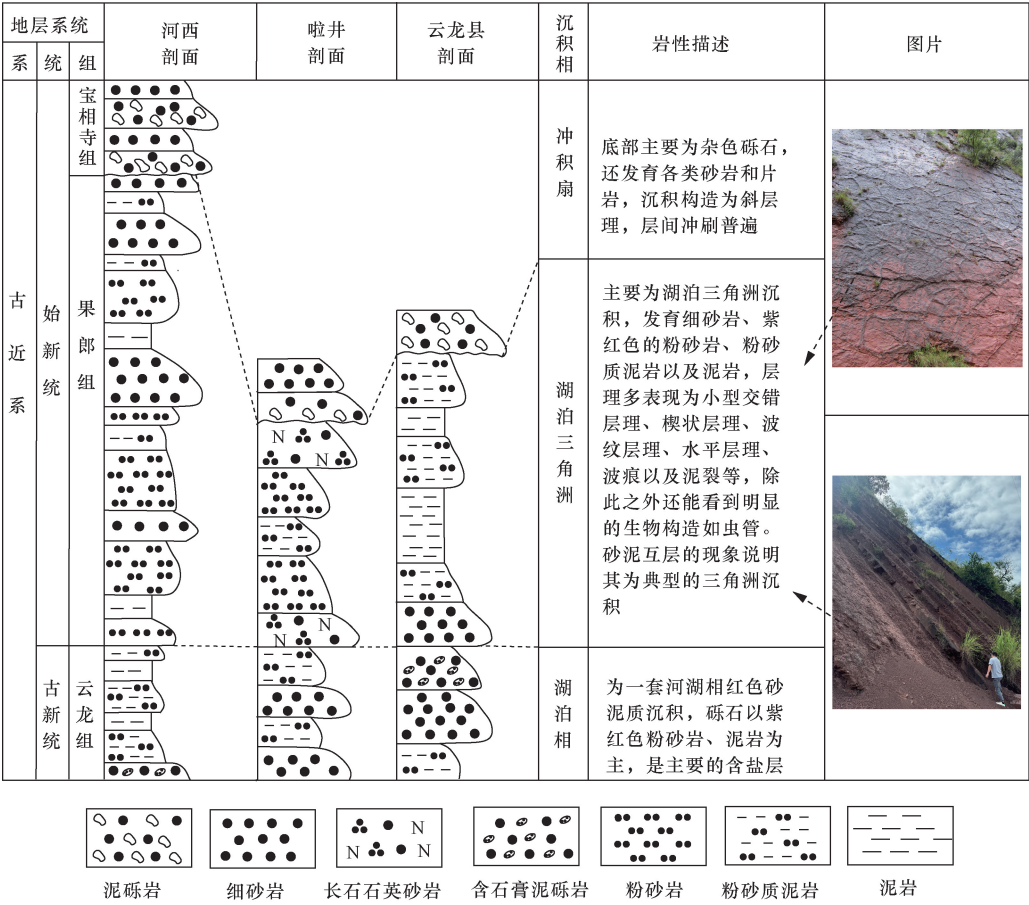


图 2 兰坪盆地果郎组剖面柱状图
Fig. 2 Bar chart of Guolang Formation in Lanping Basin

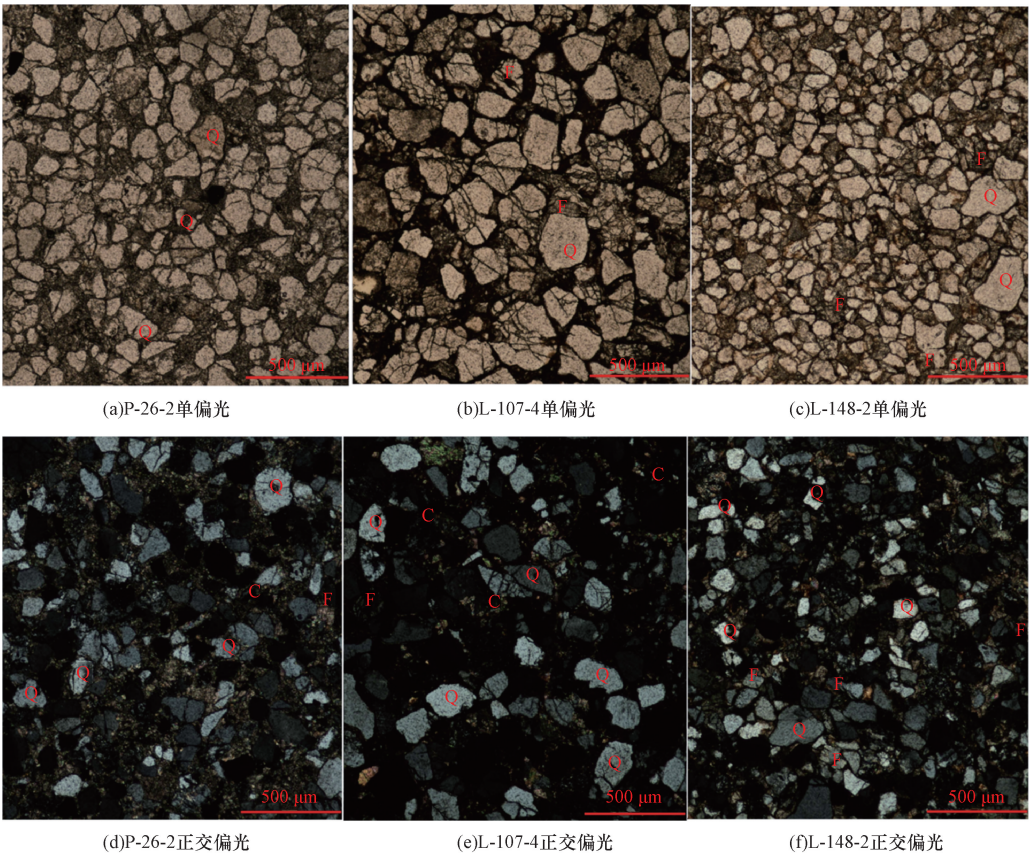
数据的精确性。参照表 1 粒度参数分级标准,结合镜下实测数据计算后得到各粒度参数(表 2),并对计算结果开展分级对比分析。

2.3 镜下粒度特征

利用图像法测量粒径的同时,可以更清楚地观察岩石矿物的特征^[28-32]。在三个剖面中各取一个样品进行单偏光、正交偏光镜下图像分析,结果如图 3 所示。发现研究区多发育细砂、粉砂岩,其次发育少量泥质粉砂岩和泥岩。分选性中等至较好,磨圆度为次棱角状至次圆状。河西剖面样品中石英含量较多,大于 75%,长石含量较少,颗粒支撑,含有少量杂基,局部发育基底式胶结[图 3(b)、图 3(e)];啦井剖面样品长石石英砂岩较发育,石英含量约 60%,长

石相对发育,沉积物颗粒较大,多为颗粒支撑,杂基含量较少,还包含少量钙质结核[图 3(a)、图 3(d)];云龙县剖面样品多为长石石英砂岩,颗粒较细,杂基含量相对较少,由颗粒间相互支撑[图 3(c)、图 3(f)]。果郎组碎屑颗粒分选、磨圆中等,杂基含量少,这进一步反映了水动力条件具有筛选作用,将沉积物淘洗并搬运,使得粒径相近的沉积物沉积下来,成分成熟度较高,物源距离适中。

表 1 所示结果显示,研究区剖面的样品平均粒径 M_z 为 3.949Φ ($1.867\Phi \sim 5.931\Phi$),主要为细砂岩和粉砂岩;标准偏差 σ_1 为 0.636Φ ($0.495\Phi \sim 0.820\Phi$),显示出分选较好;偏度 SK 值范围介于 0.078Φ ($-0.067\Phi \sim 0.180\Phi$),大部分样品为近对称



Q 为石英,F 为长石,C 为钙质结核

图 3 果郎组样品镜下图像

Fig. 3 Microscopic image of the sample in Lanping Basin

表 1 各粒度参数等级划分

Table 1 Classification of particle size parameter levels							
σ_1	<0.35	0.35~0.5	0.5~0.71	0.71~1.0	1.0~2.0	2.0~4.0	>4.0
标准偏差	分选很好	分选好	分选较好	分选中等	分选较差	分选很差	分选极差
偏度 SK	—	-1~-0.3	-0.3~-0.1	-0.1~0.1	0.1~0.3	0.3~1	—
		极负偏	负偏	近对称	正偏	极正偏	
峰度 KG	<0.67	0.67~0.9	0.9~1.11	1.11~1.56	1.56~3.0	>3.0	—
	很宽	宽	中等	尖锐	很尖锐	非常尖锐	

注:—代表没有数据。

正态状态,揭示出沉积环境为中低能环境,分选较好。峰度 KG 值为 $0.991\Phi(0.725\Phi \sim 1.206\Phi)$,多为中等峰度。

为了更好地利用测得数据,需将其编绘成能够为沉积环境分析提供依据的直方图、频率曲线图、累积曲线和概率累积曲线等图件。如图4所示为3个剖面样品的粒度资料图解,可以看出河西剖面[图4(a)、图4(d)]粒度多集中在 $3\Phi \sim 4\Phi$,主要为细砂和粉砂,频率曲线显示其为单峰正态曲线,累积曲线相对较陡,概率累积曲线显示跳跃、悬浮次总体。啦井剖面样品[图4(b)、图4(e)]主要分布

$2\Phi \sim 4\Phi$,粒径相对较粗,频率曲线显示单峰正态,累积曲线较陡,概率累积曲线显示跳跃、悬浮两个次总体。云龙县剖面[图4(c)、图4(f)]主要集中在 $3\Phi \sim 4\Phi$,其次为 $4\Phi \sim 5\Phi$,如图4(c)所示频率曲线显示其单峰正态且近对称,整体分选相对较好,累积曲线较为陡峭,概率累积曲线说明其沉积物多为悬浮方式搬运,其次为跳跃式搬运。综合分析表明,研究区果郎组主要发育细砂岩和粉砂岩,分选性较好,是水体能量较为稳定的沉积环境,且沉积物经受一定距离的搬运和多次分选,符合湖泊三角洲沉积环境的特征。

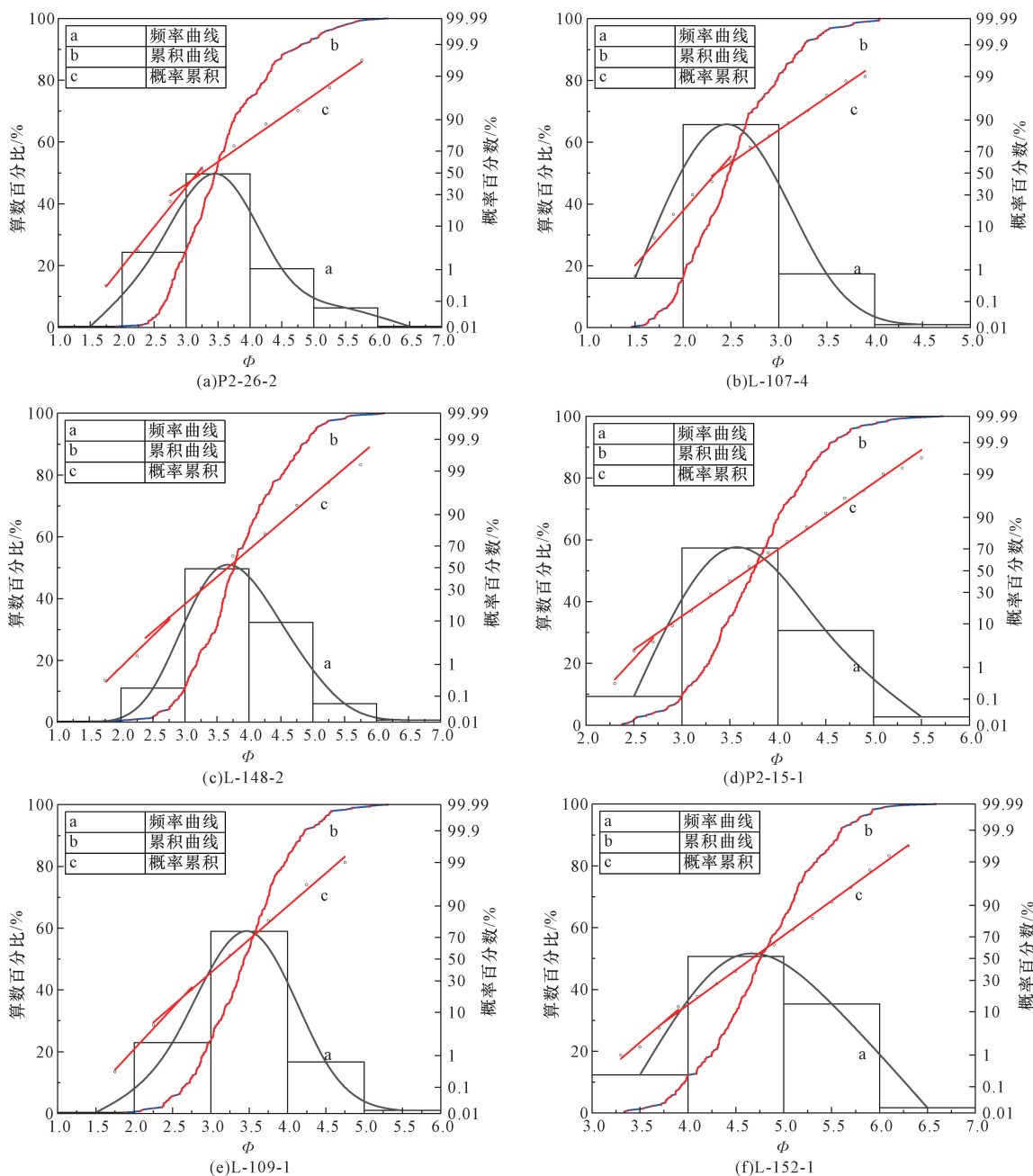


图4 果郎组粒度资料图解

Fig. 4 grain size data diagrams of the Guolang Formation

表 2 研究区剖面样品各粒度参数值

Table 2 Particle size parameter values of cross-sectional samples in the study area

剖面	样品	平均粒径	标准偏差	偏度	峰度
河西乡	P2-1-1	5.078	0.628	0.053	0.877
	P2-2-1	4.590	0.558	0.035	1.090
	P2-4-1	3.918	0.820	0.238	1.110
	P2-6-1	4.986	0.556	0.014	1.030
	P2-15-1	3.761	0.584	0.035	0.951
	P2-24-1	3.675	0.715	0.168	1.110
	P2-26-2	3.538	0.763	0.240	1.005
	P2-32-2	5.271	0.633	0.045	1.206
	P2-35-1	2.481	0.692	0.063	0.914
啦井	P2-37-1	5.931	0.544	-0.067	0.725
	L-106-1	3.158	0.663	0.007	1.089
	L-106-2	3.493	0.621	0.075	1.025
	L-107-1	3.856	0.631	0.109	0.898
	L-107-4	2.513	0.525	0.121	0.964
	L-107-5	3.938	0.593	0.097	0.996
	L-108-1	3.522	0.631	0.012	1.003
	L-109-1	3.433	0.591	0.015	1.044
	L-109-2	1.867	0.495	0.103	0.963
云龙县	L-148-1	3.782	0.751	0.169	1.022
	L-148-2	3.833	0.734	0.122	0.934
	L-150-1	3.864	0.498	-0.022	0.937
	L-151-1	4.427	0.657	0.089	1.055
	L-152-1	4.554	0.618	0.045	0.960
	L-152-2	3.821	0.782	0.180	1.046
	L-153-1	5.172	0.637	0.035	0.896
	L-154-1	4.505	0.615	0.025	0.975
	L-155-1	3.673	0.638	0.015	0.919

3 结果

兰坪盆地果郎组以紫红色细砂岩、粉砂岩夹有少量灰绿色泥岩为主,宏观上具有明显的砂泥岩互层特征。砂岩中多发育小型交错层理[图 5(a)]、波状层理[图 5(b)]、平行层理[图 5(c)]等层理构造,层面还发育波痕[图 5(d)]、泥裂[图 5(e)]和虫管(生物遗迹)[图 5(f)]等层面构造。

波痕由水流或波浪等作用在沉积物表面形成的波状构造,是识别滨浅湖以及三角洲等沉积环境的重要标志之一。泥岩表面存在的泥裂现象是由于沉积物暴露水面后,经暴晒或干旱气候的影响失水收缩形成的多边形裂缝,指示了间歇性暴露的沉积环境。虫管化石常见于河口、湖泊、三角洲等水生环境,因浅水地带的光照充足、氧气含量高以及营养物质丰富等良好条件,管造生物多在此生存,果郎组发现的虫管化石也证明了这一点。综上,兰坪盆地始新统果郎组为周期性暴露和水动力波动但整体相对稳定的湖泊三角洲沉积环境。

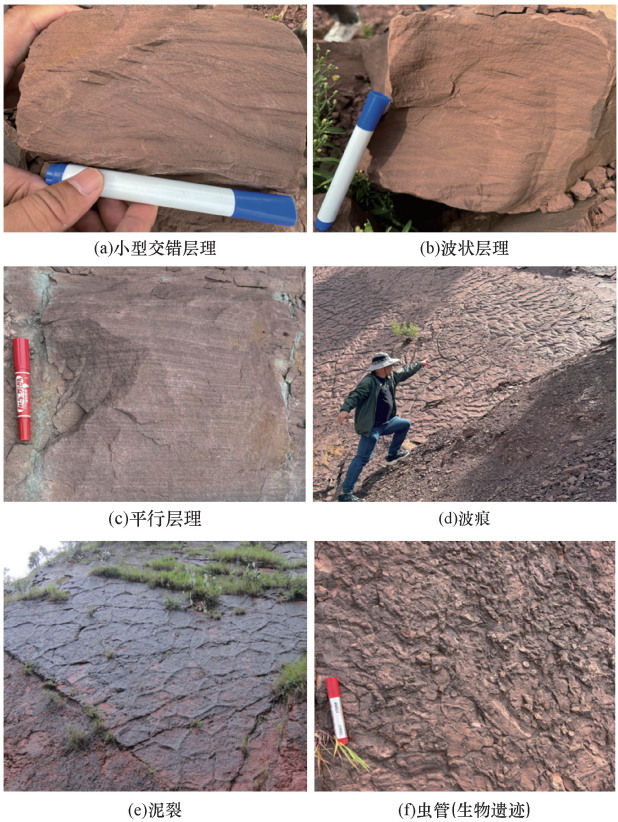


图 5 兰坪盆地果郎组沉积构造

Fig. 5 Sedimentary structure of the Guolang Formation in Lanping Basin

4 地球化学特征

4.1 样品测试与分析

碎屑岩的地球化学特征可以反映沉积物更细致的地质信息,进而有效地推断其沉积环境。前人应用碎屑岩地球化学方法来判别沉积物源岩性质,以及源岩形成时的构造背景^[33]。本次共测试了果郎组 26 件样品的地球化学元素相关值,由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素在飞利浦 PW2 404X 射线荧光光谱仪上完成,依据 GB/T 14506.28—2010 中硅酸盐岩石化学分析 X 射线荧光光谱法测定主、次元素含量,相对偏差 <5%。稀土、微量元素含量在 Finnigan MAT 制造,HR-ICP-MS(Element I) 仪器上完成,测试方法和依据为 DZ/T0 223—2011 中电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS) 方法通则,微量元素含量大于 10 μg/g 时,相对偏差 <5%,反之,相对偏差 <10%。测定稀土元素时相对偏差 <2%。

4.2 主量元素特征

沉积岩中常量元素的含量与组成岩石的主要矿物成分有关,在沉积岩中丰度最高的元素为 Si、

Al、Fe、Ca、Na、K、Mg,它们以硅酸盐,铝硅酸盐,碳酸盐矿物形式存在^[34]。常用微量元素 Sr、Ba、V、Ni、Co 的质量分数及其相关比值的大小与变化来研究古沉积环境特征^[5]。研究区样品常量元素含量分析如表 3 所示^[35],其中 SiO₂作为碎屑矿物的主要成分,在河西剖面的含量介于 45.40% ~ 77.76%,平均值为 55.74%;啦井剖面 SiO₂含量为 76.13% (66.85% ~ 89.44%);云龙县剖面 SiO₂含量为 71.69% (44.45% ~ 71.69%),多在 55% ~ 75%。河西剖面 Al₂O₃含量均值为 8.04% (3.61% ~ 11.39%);啦井剖面 Al₂O₃含量为 6.18% (4.50% ~ 9.95%);云龙县剖面 Al₂O₃含量在 8.21% (4.60% ~ 12.57%),Al₂O₃含量相对 SiO₂含量较少。

SiO₂/Al₂O₃可以反映沉积物粒度且与水动力的强弱呈正相关性,三组样品的 SiO₂/Al₂O₃均值分别为 7.97%、8.09%、13.93% (3.45% ~ 14.32%),指示石英富集的中低能水体环境。

哈克图解是地球化学中用于表征主量元素相关关系的图示方法。其横坐标为 SiO₂含量,以 Al₂O₃、FeO、CaO 等含量为纵坐标,反映不同主量元素之间的变化趋势^[36]。如图 6 为果郎组样品的哈克图解,可以看出 Al₂O₃和 CaO 与 SiO₂呈负相关性。图 6(a)中,Al₂O₃随着 SiO₂上升而下降。由于 Al₂O₃常赋存于黏土矿物(如高岭石、伊利石)中,而 SiO₂主要来自石英,这意味着当沉积岩中的 SiO₂含量增加时,不稳定的黏土矿物可能随之风化、搬运,这导致矿物的成

表 3 各剖面样品主量元素含量^[35]
Table 3 Major element contents of samples from each section^[35]

剖面	样品	含量/%											烧失量/%
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	
河西乡	P2-1-1	55.03	10.95	3.47	1.88	11.53	0.47	2.38	0.110	0.58	0.110	1.60	13.45
	P2-2-1	57.33	9.79	3.67	1.72	11.32	0.33	2.09	0.110	0.51	0.097	1.85	12.97
	P2-4-1	77.76	7.44	1.80	1.38	3.72	0.94	1.04	0.075	0.34	0.050	0.85	5.15
	P2-6-1	57.64	10.04	3.10	1.50	11.93	0.19	2.28	0.120	0.52	0.095	1.75	12.26
	P2-15-1	57.18	9.62	3.16	4.84	8.27	0.41	2.33	0.140	0.54	0.110	0.70	12.95
	P2-24-1	45.40	4.32	1.97	9.64	16.13	0.56	0.84	0.190	0.17	0.036	0.85	20.20
	P2-26-2	60.51	4.48	1.23	5.64	11.75	0.37	0.78	0.120	0.19	0.047	0.60	14.28
	P2-32-2	44.21	8.72	3.86	10.06	11.80	0.61	1.81	0.210	0.52	0.130	2.50	17.99
	P2-35-1	51.69	3.61	1.17	0.75	13.65	0.56	0.97	0.020	0.16	0.044	0.75	8.94
啦井	P2-37-1	50.65	11.39	6.06	6.23	7.68	0.41	2.66	0.150	0.65	0.120	3.50	13.84
	L-106-1	73.93	5.64	1.26	2.58	6.61	1.43	0.89	0.140	0.250	0.045	0.20	6.66
	L-107-4	74.29	4.50	1.00	0.60	10.10	0.67	1.47	0.072	0.150	0.038	0.15	6.56
	L-108-1	66.85	9.95	2.27	2.92	5.37	0.19	6.04	0.052	0.420	0.074	0.30	5.32
	L-109-2	89.44	4.61	0.74	0.36	0.66	0.47	2.64	0.009	0.084	0.029	0.10	0.44
云龙县	L-148-1	56.84	7.48	1.64	3.43	14.04	0.91	1.66	0.300	0.28	0.066	0.25	12.81
	L-148-2	61.37	12.57	4.40	2.35	6.64	0.78	2.85	0.110	0.71	0.140	1.00	7.85
	L-150-1	55.96	7.01	2.32	1.33	17.73	0.88	1.52	0.200	0.53	0.092	0.50	11.91
	L-152-1	58.86	10.19	3.38	2.26	11.02	0.91	2.14	0.200	0.58	0.110	0.70	9.99
	L-152-2	44.45	6.22	1.56	1.08	27.61	0.76	1.10	0.250	0.31	0.047	0.30	16.07
	L-153-1	63.96	9.40	3.09	1.56	10.02	1.13	1.74	0.080	0.52	0.096	0.75	7.88
	L-155-1	71.69	4.60	1.47	0.83	10.81	0.88	0.92	0.110	0.34	0.058	0.30	7.77

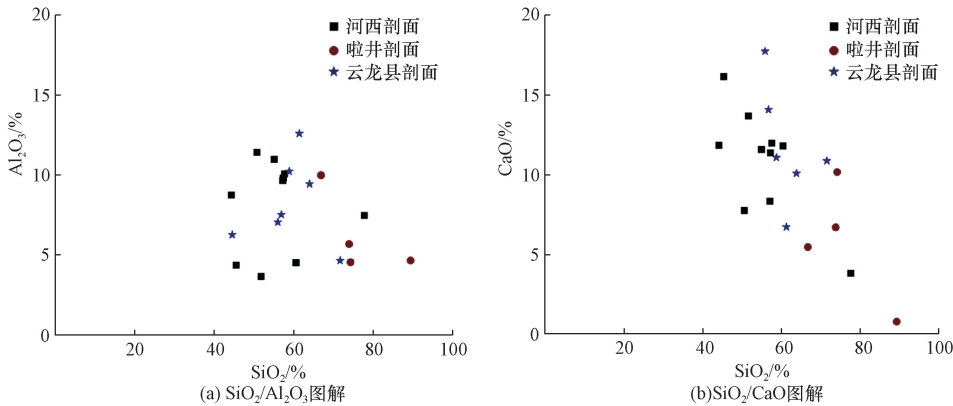


图 6 兰坪盆地果郎组哈克图解
Fig. 6 Harker Diagrams of the Guolang Formation in the Lanping Basin

熟度逐渐升高,从而使 Al_2O_3 含量降低;同样地, CaO 主要附着于碳酸盐矿物(如方解石、白云石)中,其化学稳定性弱,易在化学风化或成岩过程中溶解迁移,而石英的抗风化能力强,因此 CaO 含量会随着 SiO_2 的升高而降低,显示反向趋势[图 6(b)]。

4.3 微量元素特征

通过对沉积岩中微量元素含量及分布,尤其是一些相关元素比值的研究,可以推断沉积环境,反演当时的地质条件^[15]。微量元素的比值可以反映沉积环境的氧化还原和水动力指标。如表 4^[35]所示,本次研究共测试了果郎组样品的 Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Y、Zr、Nb、Hf、Ta、Th、U、Rb、Sr、Cs、Ba、Pb 共 20 种微量元素的含量。果郎组 U/Th 均值为 0.25 $\mu\text{g/g}$ (0.16 ~ 0.31 $\mu\text{g/g}$),为氧化环境的标识;V/Cr 均值为 1.39 $\mu\text{g/g}$ (0.82 ~ 1.86 $\mu\text{g/g}$),大部分样品数值均小于 1.5,说明了较强的水体环境;Co/Ni 均值为 0.41 $\mu\text{g/g}$ (0.25 ~ 0.64 $\mu\text{g/g}$),样品数值全部小于 1,指示三角洲沉积环境;Zr/Hf 均值 36.31 $\mu\text{g/g}$ (18.43 ~ 39.30 $\mu\text{g/g}$),除样品 P2-26-2 外,其余均介于 30 ~ 40 内,接近地壳平均值 36,锆

石抗风化能力极强,Zr/Hf 保留陆源碎屑原始比值。样品经 UCC(upper continental crust)标准化^[37]后绘制相应微量元素蛛网图[图 7(a) ~ 图 7(c)],与 UCC 相比,过渡元素中,河西乡剖面除 P2-37-1 的 Cu 表现出明显富集外,其他样品中的 Cu 明显亏损;Zn 在 P2-37-1 中接近 UCC 值,在其他样品中为明显亏损;大部分样品的 Y、Zr 以及 Nb 元素都明显亏损,Sc、V、Cr、Co、Ni 则在不同样品中表现出不同程度的富集和亏损。啦井剖面中的 Cu 在所有样品中均为亏损状态;V、Cr、Ni、Zn、Y、Zr 和 Nb 元素除在 L-107-5 中呈接近 UCC 值或相对富集的状态外,在其他样品中均为亏损;Sc、Co 则在所有样品中亏损。云龙县剖面的 Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Y、Zr 元素在所有样品中显示出不同程度的富集和亏损。高场强元素中,河西剖面的 Hf、Ta 元素在所有样品中呈现亏损;Th 和 U 元素除样品 P2-37-1 接近 UCC 值外其余均亏损。啦井剖面的 Ta 和 U 元素在所有样品中为亏损状态;Hf 和 Th 元素在样品 L-107-5 中接近 UCC 值,其余均为亏损。云龙县剖面中除 Ta 元素全部亏损外,其他元素在不同样品中呈现富集或亏损。大离子亲石元素中,河西剖面除 Rb 全部亏损外,Sr、

表 4 各剖面样品微量元素含量^[35]
Table 4 Trace element contents of samples from each section^[35]

剖面	样品	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)																			
		Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Y	Zr	Nb	Hf	Ta	Th	U	Rb	Sr	Cs	Ba	Pb
河西乡	P2-1-1	9.01	69.7	46.20	11.40	24.80	14.00	20.30	11.50	22.70	165.0	12.70	4.27	0.849	9.430	2.430	84.2	238.0	10.30	160.0	5.81
	P2-2-1	8.10	63.5	46.80	13.10	28.20	17.00	27.80	10.80	21.50	158.0	11.20	4.40	0.748	8.990	2.290	76.9	207.0	9.58	152.0	5.98
	P2-4-1	4.54	32.3	27.90	8.06	14.40	12.60	15.40	6.61	12.70	128.0	6.89	3.45	0.480	5.560	1.230	35.7	160.0	2.96	90.8	2.50
	P2-6-1	7.83	58.9	38.70	12.70	21.10	12.70	16.40	10.70	24.10	185.0	10.80	4.80	0.766	8.290	2.260	79.3	315.0	9.61	156.0	4.15
	P2-15-1	6.57	50.8	37.20	6.88	17.40	15.20	19.30	8.93	17.60	136.0	10.20	3.69	0.698	7.840	1.990	66.4	81.4	8.05	155.0	3.64
	P2-24-1	3.27	20.0	10.70	4.64	8.42	6.51	13.50	3.69	10.50	44.9	3.89	1.19	0.303	2.770	0.693	24.6	52.4	2.93	243.0	1.93
	P2-26-2	1.91	14.8	9.04	3.34	8.38	10.40	13.00	3.04	7.26	43.3	3.87	2.35	0.245	2.740	0.847	18.5	77.4	2.46	537.0	1.19
	P2-32-2	7.66	62.7	45.30	12.90	24.90	11.90	47.10	10.50	26.10	138.0	10.10	4.05	0.691	8.330	2.370	63.0	60.7	4.91	145.0	3.45
	P2-35-1	2.45	21.2	12.50	2.74	9.50	12.50	17.20	3.96	7.13	66.7	3.80	1.82	0.272	3.200	0.990	28.6	422.0	1.64	152.0	5.84
	P2-37-1	11.00	83.2	55.70	18.40	34.50	190.00	62.50	14.90	28.00	164.0	13.20	4.46	0.943	11.300	3.110	100.0	65.2	12.50	201.0	4.19
啦井	L-106-1	3.10	20.1	16.50	1.48	4.44	10.30	11.10	4.78	11.00	88.3	4.33	2.40	0.304	4.590	1.040	20.5	68.3	1.08	64.7	6.06
	L-107-4	1.98	14.1	17.30	1.47	5.17	6.94	23.50	3.60	9.00	68.5	2.76	1.82	0.194	2.550	0.611	36.7	94.5	2.07	145.0	10.10
	L-107-5	8.30	61.6	49.90	8.90	23.70	14.40	93.90	10.30	21.90	218.0	10.60	5.78	0.820	9.730	2.510	80.3	90.8	7.23	204.0	19.40
	L-108-1	6.71	32.2	23.80	3.99	10.70	7.43	22.10	9.17	13.90	111.0	8.33	3.00	0.684	7.640	1.550	93.5	52.0	2.88	434.0	10.80
	L-109-1	1.49	10.2	9.05	1.03	4.17	3.98	5.89	5.71	4.98	44.9	2.33	1.42	0.197	3.460	0.835	83.1	130.0	1.62	430.0	10.40
	L-109-2	1.95	13.6	9.14	1.14	4.19	4.75	6.79	4.77	8.12	41.7	2.03	1.17	0.172	3.970	0.644	78.7	87.7	1.42	382.0	20.00
云龙县	L-148-1	3.71	29.9	16.10	6.01	9.41	12.70	12.80	5.34	15.50	103.0	5.01	2.68	0.353	3.860	0.993	41.5	176.0	1.61	188.0	7.07
	L-148-2	10.10	81.7	57.20	10.20	28.20	21.50	56.00	13.70	27.30	221.0	13.50	5.72	0.925	11.200	2.640	91.9	103.0	6.38	286.0	15.40
	L-150-1	4.71	37.6	36.70	4.57	13.20	17.00	27.30	6.34	24.90	257.0	9.49	6.85	0.656	7.050	2.010	42.4	118.0	2.29	315.0	10.60
	L-150-2	5.70	40.2	25.00	4.47	10.60	16.40	23.30	7.17	14.50	112.0	6.97	3.11	0.498	5.300	1.340	53.7	166.0	2.40	216.0	9.52
	L-151-1	7.96	65.5	41.70	9.50	24.40	18.80	50.40	10.70	26.70	165.0	11.20	4.48	0.823	8.740	2.140	72.4	109.0	4.76	254.0	13.60
	L-151-2	12.50	101.0	64.60	14.00	36.30	17.60	74.20	16.20	28.20	209.0	14.80	5.58	1.060	12.800	2.980	119.0	100.0	8.65	336.0	20.40
	L-152-1	7.71	61.4	41.50	9.19	22.30	24.90	46.80	10.40	26.80	186.0	10.30	4.83	0.707	8.940	2.140	68.7	116.0	4.29	294.0	13.40
	L-152-2	3.87	25.9	24.90	3.45	12.00	16.50	19.50	5.63	22.50	112.0	5.70	2.85	0.429	4.340	1.060	31.4	105.0	1.73	114.0	7.73
	L-153-1	6.68	49.6	40.70	7.00	20.00	22.30	41.80	9.21	21.90	173.0	9.07	4.67	0.620	7.560	1.820	55.4	94.1	3.49	206.0	11.10
	L-155-1	3.39	25.9	21.90	4.00	9.81	19.00	23.20	5.17	15.70	180.0	6.37	4.84	0.434	5.140	1.400	29.8	81.6	1.55	458.0	6.57

Cs、Ba 均在不同样品中体现出富集和亏损的变化。啦井剖面 Rb 和 Sr 元素在所有样品中亏损;Cs、Ba 则在不同样品中表现亏损或富集。云龙县剖面的 Sr 和 Ba 全部呈亏损状态;Rb 和 Cs 元素在不同样品中体现出富集和亏损的变化。除此之外,Ga 在三个剖面的所有样品中均表现为亏损状态,除河西剖面的 Pb 元素表现为亏损外,啦井、云龙县剖面的 Pb 呈现不同程度的亏损或富集。

4.4 稀土元素特征

稀土元素也是地球化学中的一项重要指标,稀土元素含量(rare earth elements,REE)总和能明显反映出各类岩石的特征,对于判断岩石的源岩特征和区分岩石类型具有重要意义^[38-41]。如表 5 所示^[35],河西乡剖面样品稀土总量为 99.90 μg/g(42.61 ~ 160.35 μg/g);啦井剖面样品稀土总量为 74.28 μg/g(38.34 ~ 129.19 μg/g);云龙县剖面样品稀土总量为 122.47 μg/g(66.55 ~ 165.41 μg/g)。经球粒陨石标准化^[42]后,三个剖面均呈现明显的 Eu 负异常,显示了 Eu 相对亏损。河西乡剖面的 δEu 为 0.73 μg/g(0.68 ~ 0.82 μg/g);啦井剖面的 δEu 为 0.80 μg/g(0.69 ~ 0.89 μg/g);云龙县剖面的 δEu 为 0.80 μg/g(0.66 ~ 0.77 μg/g)。沉积物的轻稀土元素 LREE(light rare earth elements)相对富集,在河西乡剖面中果郎组 Σ LREE 为 88.77 μg/g

(35.59 ~ 141.09 μg/g);啦井剖面的 Σ LREE 为 65.98 μg/g(34.86 ~ 113.78 μg/g);云龙县剖面的 Σ LREE 为 107.39 μg/g(55.78 ~ 146.34 μg/g);河西乡剖面的重稀土元素 HREE(heavy rare earth elements)总量为 12.13 μg/g(4.99 ~ 19.26 μg/g),LREE/HREE 为 7.21(4.64 ~ 8.69);啦井剖面的重稀土元素总量为 8.31 μg/g(3.48 ~ 15.42 μg/g),LREE/HREE 为 8.06(6.34 ~ 10.01);云龙县剖面的重稀土元素总量为 15.07 μg/g(9.58 ~ 19.06 μg/g),LREE/HREE 为 7.09(5.18 ~ 8.50)。表明样品轻稀土富集而重稀土亏损,与图中显示的稀土元素分配模式总体呈现“左陡右缓”的趋势一致,曲线整体拟合度较高[图 7(d) ~ 图 7(f)]。分馏程度由 La/Sm 和 Gd/Yb 指标判定,La/Sm 越大,说明 La 相对 Sm 越富集,分馏程度越强,同样,重稀土元素中 Gd/Yb 越大,Gd 相对 Yb 越富集,分馏程度越强。在河西乡剖面样品中 La/Sm 为 4.98(2.65 ~ 6.13);啦井剖面样品的 La/Sm 为 5.50(3.07 ~ 6.73);云龙县剖面样品的 La/Sm 为 4.93(3.18 ~ 6.01),指示了轻稀土元素整体较明显的分馏程度,局部差异相对明显。河西剖面的 Gd/Yb 为 2.10(1.76 ~ 3.10);啦井剖面的 Gd/Yb 为 2.23(1.69 ~ 3.44);云龙县剖面的 Gd/Yb 为 2.17(1.78 ~ 3.00),指示重稀土元素的分馏程度整体较弱,相对均一,局部差异不明显。

表 5 各剖面样品稀土元素含量^[35]

Table 5 Rare earth element contents of samples from each section^[35]

剖面	样品	含量/(μg·g ⁻¹)													
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
河西乡	P2-1-1	28.70	55.0	6.58	25.20	4.76	1.050	4.28	0.745	4.190	0.751	2.370	0.375	2.330	0.341
	P2-2-1	25.60	50.0	6.27	24.00	4.44	1.000	4.20	0.755	3.900	0.745	2.160	0.356	2.210	0.337
	P2-4-1	16.50	31.3	3.80	13.50	2.69	0.587	2.39	0.387	2.180	0.462	1.250	0.209	1.360	0.215
	P2-6-1	25.20	48.5	6.21	23.70	4.62	0.959	4.52	0.785	4.300	0.824	2.210	0.374	2.330	0.393
	P2-15-1	20.30	39.2	4.79	19.50	3.88	0.873	3.49	0.613	3.340	0.670	1.830	0.300	1.930	0.304
	P2-24-1	6.80	15.4	1.89	8.22	2.57	0.708	2.39	0.440	2.280	0.372	0.907	0.142	0.982	0.164
	P2-26-2	7.80	16.2	2.02	8.28	2.23	0.572	1.99	0.293	1.420	0.260	0.682	0.109	0.642	0.114
	P2-32-2	26.90	54.0	6.72	27.30	5.71	1.230	5.27	0.881	4.640	0.874	2.400	0.391	2.340	0.378
	P2-35-1	10.10	19.1	2.42	9.49	1.93	0.337	1.44	0.236	1.360	0.251	0.712	0.112	0.757	0.122
啦井	P2-37-1	32.40	62.2	8.02	30.70	6.41	1.360	5.69	0.993	5.070	0.977	2.850	0.457	2.790	0.431
	L-106-1	14.20	26.2	2.99	11.00	2.11	0.467	2.03	0.388	2.200	0.425	1.190	0.204	1.190	0.185
	L-107-4	10.20	20.3	2.62	10.00	2.13	0.607	1.89	0.340	1.770	0.302	0.854	0.131	0.808	0.125
	L-107-5	27.30	50.9	6.31	23.90	4.46	0.905	4.39	0.727	4.040	0.782	2.430	0.383	2.310	0.353
	L-108-1	24.00	43.9	5.73	23.50	4.05	0.817	3.22	0.505	2.740	0.501	1.380	0.243	1.410	0.246
	L-109-1	8.42	15.2	1.98	7.60	1.32	0.341	1.03	0.156	0.834	0.156	0.525	0.076	0.610	0.095
云龙县	L-109-2	8.28	15.3	2.92	12.50	2.70	0.708	2.33	0.361	1.940	0.296	0.817	0.133	0.677	0.109
	L-148-1	10.70	23.0	3.38	14.50	3.37	0.830	3.29	0.595	3.100	0.559	1.480	0.210	1.330	0.207
	L-148-2	31.50	59.4	6.89	27.40	5.29	1.100	4.99	0.895	5.000	0.910	2.720	0.475	2.810	0.415
	L-150-1	26.60	57.1	6.87	27.60	5.63	1.240	5.18	0.894	4.780	0.861	2.320	0.348	2.250	0.355
	L-150-2	17.70	37.4	4.57	17.50	3.18	0.698	2.82	0.467	2.550	0.484	1.390	0.226	1.420	0.224
	L-151-1	28.60	56.5	7.28	29.20	5.73	1.250	5.33	0.934	5.130	0.902	2.680	0.411	2.230	0.371
	L-151-2	35.20	65.0	7.97	31.10	5.86	1.210	5.31	0.918	5.060	1.010	2.960	0.493	2.830	0.484
	L-152-1	27.50	55.9	6.82	27.20	5.48	1.110	5.30	0.904	5.040	0.927	2.670	0.434	2.510	0.406
	L-152-2	19.90	52.3	5.67	23.70	5.25	1.150	5.09	0.830	4.190	0.708	1.880	0.281	1.700	0.259
	L-153-1	23.70	43.9	5.76	22.80	4.49	0.952	4.13	0.712	3.980	0.705	2.150	0.343	2.090	0.338
	L-155-1	16.10	31.9	4.03	16.10	3.14	0.720	2.95	0.515	2.870	0.541	1.600	0.249	1.590	0.238

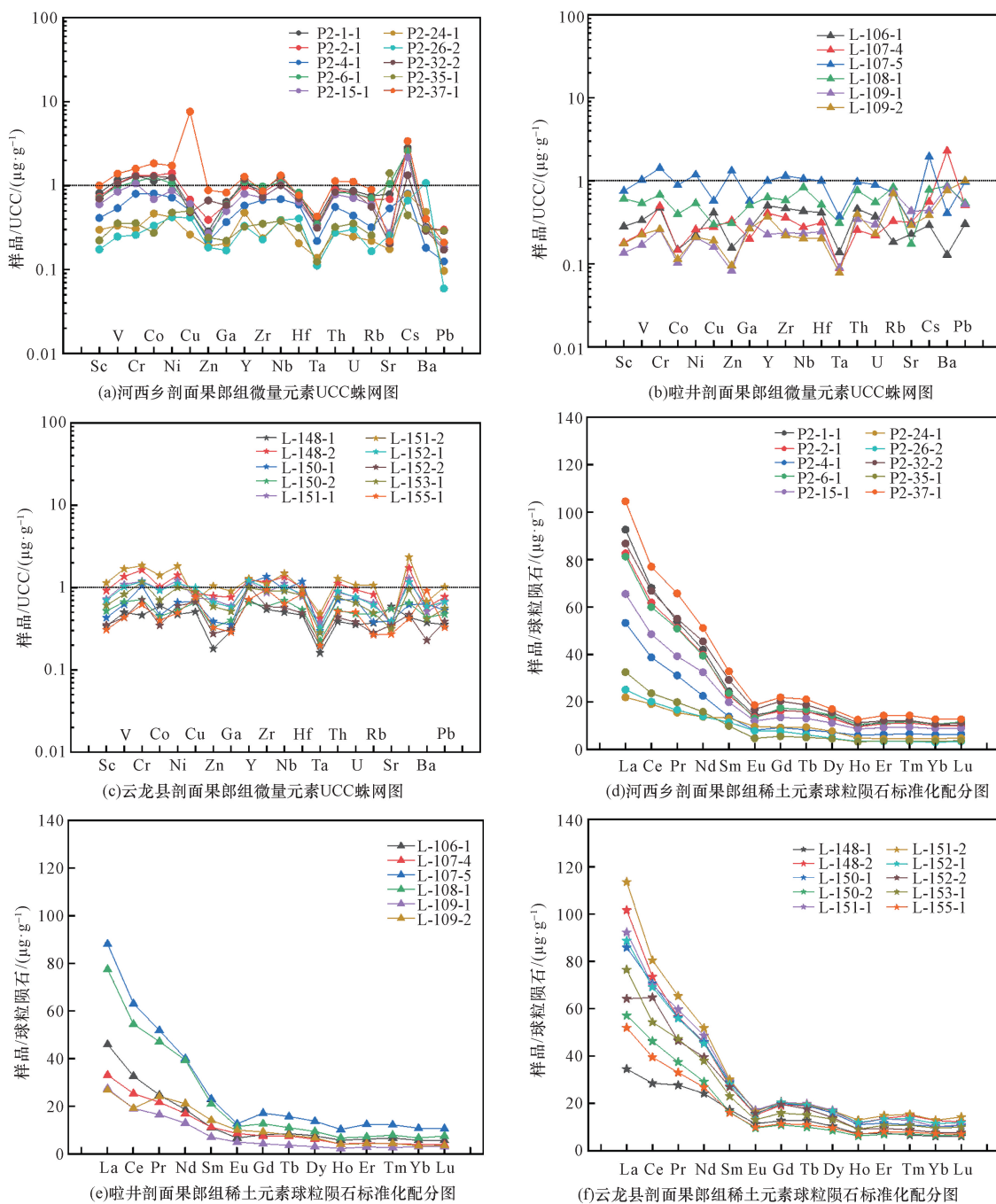


图7 果郎组微量元素 UCC 蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化配分图

Fig. 7 Trace element UCC spider diagram and rare earth element chondrite-normalized distribution diagram of the Guolang Formation

4.5 特征元素比值分析

在沉积岩中,有些元素的特定比值可以判断其沉积环境,反映古环境的沉积特征。Sr 和 Ba 作为两个常见的微量元素,因地球化学行为的差异,其比值可以用来反映沉积环境的古盐度^[43-45]。通常情况下, $Sr/Ba > 1$ 为海相沉积环境,说明水体环境中盐度含量高,而陆相淡水沉积物的 $Sr/Ba < 1$,指示盐度低的环境。在兰坪盆地果郎组样品中, Sr/Ba

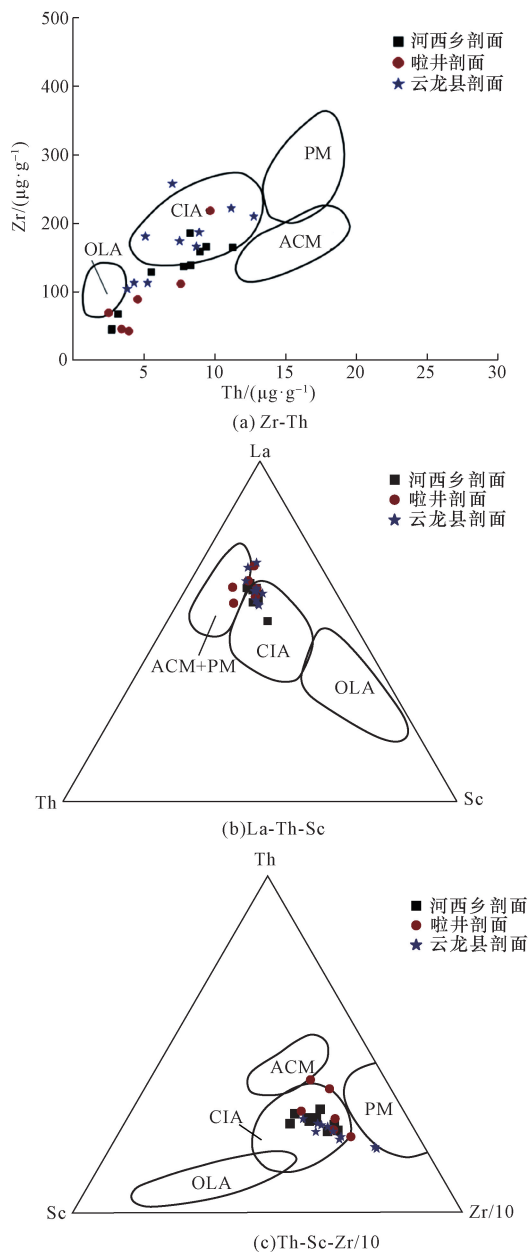
范围在 0.71 (0.11 ~ 2.78),说明本组样品形成于陆相淡水的沉积环境。V 和 Ni 作为过渡金属,其比值 V/Ni 和 $V/(V + Ni)$ 也是常用的地球化学指标,可以反映沉积环境的氧化还原程度^[46-48]。当 $V/Ni > 4.25$ 时,指示缺氧环境;当 $V/Ni < 2.75$ 时,指示氧化环境^[49-51]。果郎组样品的 V/Ni 值为 2.73 (1.77 ~ 4.53),总体小于 2.75。0.83 为氧化还原的临界值,当 $V/(V + Ni) > 0.83$ 时为缺氧环境,

反之则为氧化环境^[52]。本组样品中, $V/(V+Ni)$ 为 0.73(0.64~0.82), 小于 0.83, 指示为氧化环境。

5 讨论

5.1 物源区构造背景

Bhatia^[51] 通过利用一些不活泼微量元素(如 La、Th、Y、Zr、Ti、Co、Ni 等)及其含量比值(如 La/Y、Ti/Zr 等)的稳定性来判别大地构造环境, 根据此判别图解, 可区分大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘。如图 8 所示为三个剖面样品的



ACM 为活动大陆边缘; PM 为被动大陆边缘; CIA 为大陆岛弧;
OLA 为大洋岛弧

图 8 兰坪盆地果郎组样品 Zr-Th、La-Th-Sc、
Th-Sc-Zr/10 判别图解^[51]

Fig. 8 Discriminant diagram of Zr-Th、La-Th-Sc、
Th-Sc-Zr/10 in Guolang Formation samples from
Lanping Basin^[51]

Zr-Th、La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10 构造环境判别图。由图 8(a) 所示 Zr-Th 图可以看出, 兰坪盆地果郎组样品较为分散, 但以大陆岛弧构造背景为主, 部分散落其边界, 有两个样品在大洋岛弧边缘; 图 8(b) 所示 La-Th-Sc 图明显反映出研究区样品主要以大陆岛弧背景为主, 啦井剖面 and 云龙县剖面均有二个样品落入活动大陆边缘 + 被动大陆边缘, 其余少量样品处于活动大陆边缘 + 被动大陆边缘构造与大陆岛弧之间; 图 8(c) 所示 Th-Sc-Zr/10, 样品主要反映大陆岛弧背景, 兰坪盆地物源可能来自澜沧江火山岛弧带、昌宁-孟连缝合带, 东侧金沙江-哀牢山缝合带, 以及东北部义敦等岛弧的共同影响。如文献^[53-57]在对澜沧江断裂中段雪山河变质岩群的研究中认为该带的源岩为沉积岩夹火山凝灰物质, 这可能是近距离搬运从而为兰坪盆地提供了物质。由此, 以上三种图均表明兰坪盆地始新统果郎组样品有多物源供给的特点, 物源区主要为大陆岛弧, 除此之外还有活动大陆边缘、被动大陆边缘构造背景。

5.2 物源指示意义

La/Yb- Σ REE 图解^[58-59] [图 9(a)] 是地球化学研究中用于物源判别、沉积环境分析及源岩特征揭示的重要工具。将本文数据投点后, 得到源岩判别图解, 发现三个剖面的样品散点相对集中, 主要落入沉积岩区域, 还有少部分样品落在沉积岩与玄武岩的过渡区, 说明果郎组沉积物源岩为沉积岩, 沉积过程中可能出现过热水活动。后又利用 La/Th-Hf 图解 [图 9(b)] 对果郎组样品进行投点, 分析其源岩属性, 发现物源主要来自上地壳的长英质源区, 除此之外也有少量其他物源加入。河西、云龙县剖面的大部分样品都落入长英质源区, 少部分投影于长英质与基性岩物源混合区。啦井剖面样品则主要投点在长英质与基性岩物源混合区。Garzanti 等^[60] 曾强调, 长英质源区在 La/Th-Hf 图解中应该表现为高 La/Th (>3) 和高 Hf, 与本研究中果郎组数据 (La/Th 集中在 2.5~4.0 $\mu\text{g/g}$, Hf 集中在 4~17 $\mu\text{g/g}$) 相吻合。La/Yb- Σ REE 图解显示样品集中于沉积岩区, 与前人研究结果一致, 反映源岩经历了充分风化和再循环^[61]。说明兰坪盆地始新统果郎组的物源主要来自上地壳长英质岩石, 并混有少量基性岩。

5.3 沉积环境分析

5.3.1 概率累积曲线

如图 10 所示为各剖面果郎组概率累积曲线图, 通过图解可以看出果郎组沉积物概率累积曲线特征为“一跳一悬夹过渡”, 其主要由跳跃和悬浮两个次总体以及其中间的过渡段构成, 曲线分布相对分散,

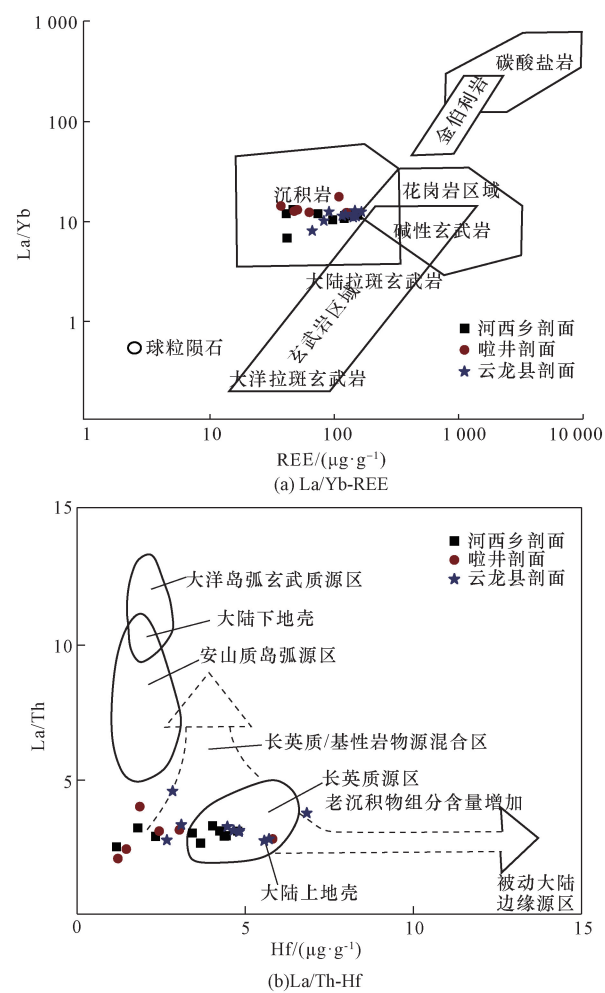


图9 兰坪盆地果郎组样品 La/Yb-REE、La/Th-Hf 图解^[59]

Fig. 9 Schematic diagram of La/Yb-REE and La/Th-Hf in Guolang Formation samples from Lanping Basin^[59]

说明果郎组沉积物类型多样,粒度变化范围相对较大。跳跃次总体占比为 30% ~ 40%,斜率约为 50%,多发育细砂级,此段沉积物分选较好,颗粒较大,水动力能量相对较高;过渡段含量在 20% ~ 30%,此段与跳跃次总体的临界点在 $2.5\Phi \sim 3\Phi$,斜率在 35% ~ 45%;悬浮次总体相对发育,含量在 40% ~ 50%,其与过渡段的临界值集中在 $3\Phi \sim 3.5\Phi$ 附近,此段沉积物类型多样,主要发育粉砂和泥岩,也有少量细砂级颗粒较大的沉积物,分选中等偏好,反映中等能量的水动力条件。

5.3.2 SK- σ_1 散点图

粒度参数散点图是一种用于分析和展示沉积物粒度特征的图解方法,是运用样品的标准偏差和偏度两个参数绘制成的图解。其中,偏度和峰度值皆能够反映碎屑沉积物粒度分布频率曲线的双峰性质及尾部变化,在判断沉积环境方面具有重要意义^[62]。

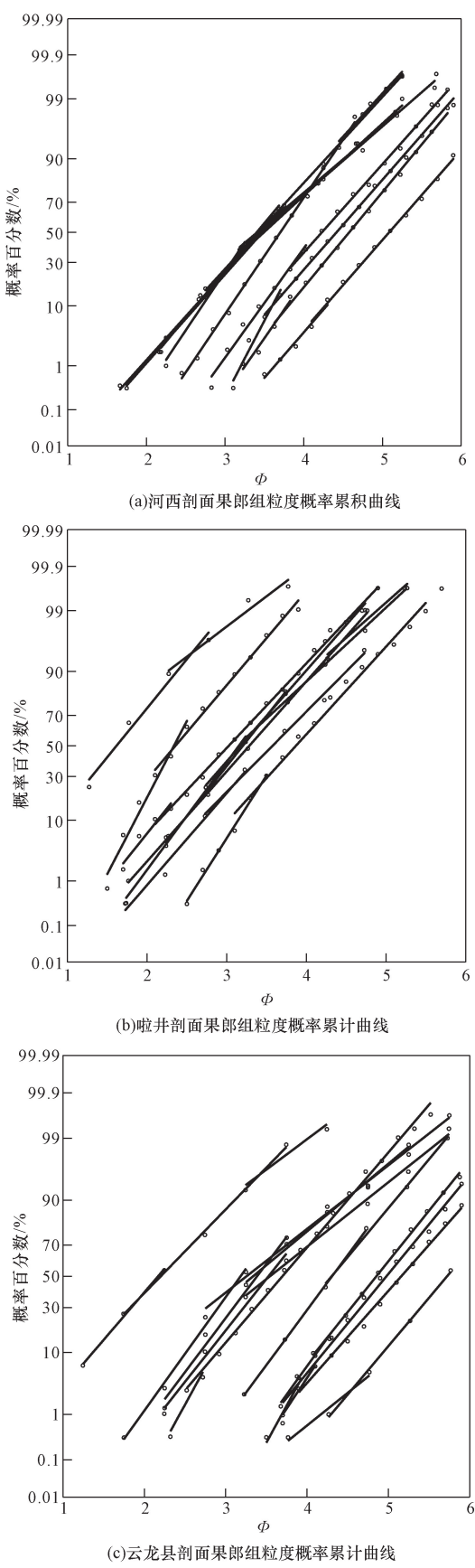


图10 兰坪盆地果郎组粒度概率累积曲线图

Fig. 10 The grain size accumulation curve of the Guolang Formation in Lanping Basin

弗里德曼研究出了应用标准偏差与偏度离散图来判别沉积环境,利用矩阵法标准偏差和矩法偏度所作的散点图,能明显地将河砂、海滩砂、湖滩砂区别开来^[63-64]。分界线左边的样品一般认为形成于湖滩砂/海滩砂沉积环境,右边的样品被认为形成于河流(三角洲)沉积环境。图 11 显示,研究区样品主要分布在河流砂区域,为河流主导的三角洲陆相沉积地层。标准偏差在 $0.5\Phi \sim 0.9\Phi$, 偏度主要为近对称形态,显示研究区沉积颗粒分选中等至较好,粗颗粒(洪水期)与细颗粒(平水期)交替沉积,导致粒度分布中等集中。

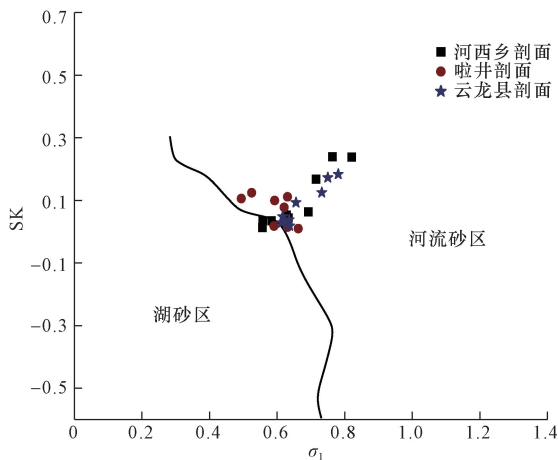
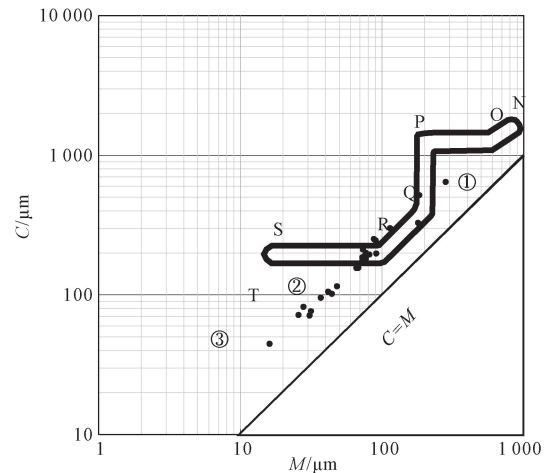


图 11 样品标准偏差与偏度散点图^[63]

Fig. 11 Scatter plot of sample standard deviation and skewness^[63]

5.3.3 C-M 图解

C-M 图是通过每个样品的 C 值和 M 值绘制而成的图形。其中, C 值是粒度累积曲线上颗粒含量为 1% 时所对应的粒径, 它与样品中最粗颗粒的粒径相近, 体现了水动力搅拌开始搬运沉积物的最大能量; M 值是粒度累积曲线上颗粒含量为 50% 时所对应的粒径, 作为中值, 其代表着水动力的平均能量。因此, C-M 图可以很好地解释沉积物中粗粒部分的粒度特点同搬运方式两者之间的关系, 为沉积环境的判断提供有力依据^[65-67]。如图 12 所示为研究区 C-M 图解。从图 12 中可以清晰地看到研究区样品的散点主要分布在①的 RS 段和②处, 主要分布于②区域, 属于牵引流和重力流共同主导的沉积, 在湖泊中较常见。河流作为搬运沉积物的主要动力, 常以牵引流或重力流方式搬运大量的碎屑物质进入湖盆, 形成三角洲或滩坝等砂体。结合果郎组沉积物镜下特征、沉积构造以及水体环境, 认为其主要是先由河湖主导的牵引流经一定距离的搬运后再经低能重力流搬运至湖盆, 从而形成砂泥互层等现象^[65]。



①为牵引沉积物;②为浊流沉积物;③为远洋悬浮沉积物

图 12 研究区 C-M 图解

Fig. 12 C-M diagram of the research area

6 结论

(1) 兰坪盆地始新统果郎组主要发育紫红色的细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和泥岩等, 发育有小型交错层理、平行层理、波状层理、波痕、泥裂和虫管等沉积构造。粒度分析结果显示偏度主要为近对称, 峰态呈中等峰态; 概率累积曲线呈现“一跳一悬夹过渡”式; SK- σ_1 散点图以及 C-M 图解显示其为河湖牵引流和低能重力流主导的沉积。

(2) 果郎组样品主量元素中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 指示中低能水体环境, 哈克图解表明 Al_2O_3 和 CaO 与 SiO_2 负相关性; 微量元素配分图显示 Cu、Ta、Pb 表现出明显亏损, Sc、V、Cr、Co、Ni、Th、U、Rb、Sr、Cs、Ba 均在不同样品中体现出富集和亏损的变化; 稀土元素配分图中出现明显的 δEu 负异常, 轻稀土富集而重稀土亏损, 分配模式总体呈现“左陡右缓”的趋势; Sr/Ba、V/Ni 和 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 则指示了含盐度低的干旱氧化环境。

(3) Zr-Th 图解显示研究区以大陆岛弧构造背景为主, La-Th-Sc 图反映大陆岛弧以及活动大陆边缘+被动大陆边缘构造背景; Th-Sc-Zr/10 中样品主要反映大陆岛弧背景, 少数样品临近活动大陆边缘; La/Yb- ΣREE 图表明研究区沉积物源岩为沉积岩, La/Th-Hf 图解说明果郎组的物源主要来自上地壳长英质岩石, 并混有少量基性岩。

参考文献

- [1] 胡永兴, 方沛英, 李爽, 等. 滇西兰坪盆地构造演化特征与成矿关系[J]. 云南地质, 2013, 32(1): 113-115.
Hu Yongxing, Fang Peiying, Li Shuang, et al. The tectonic evolution characteristics and metallogenic relationship of the Lanping Basin in Western Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2013, 32(1): 113-

- 115.
- [2] 余谦, 牟传龙, 王剑. 云南兰坪盆地三叠纪沉积相与古地理演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2000(2): 33-42.
Yu Qian, Mou Chuanlong, Wang Jian. Sedimentary facies and palaeogeographic evolution of the Lanping Basin in Yunnan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000(2): 33-42.
 - [3] 王安建, 曹殿华, 管焯, 等. 西南三江成矿带中南段金属矿床成矿规律与若干问题探讨[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1365-1375.
Wang Anjian, Cao Dianhua, Guan Ye, et al. The metallogenic regularity and some problems of metal deposits in the middle and south section of Sanjiang metallogenic belt in southwest China are discussed[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(10): 1365-1375.
 - [4] 张琪, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二[J]. 岩石学报, 2007(6): 1239-1251.
Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. The problem of granite crystallization separation; the second thinking about granite research[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007(6): 1239-1251.
 - [5] 朱志军, 姜勇彪, 郭福生, 等. 兰坪盆地古近纪沉积相类型及沉积环境演化[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3): 409-418.
Zhu Zhijun, Jiang Yongbiao, Guo Fusheng, et al. Paleogene sedimentary facies types and sedimentary environment evolution in Lanping Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(3): 409-418.
 - [6] 范天来, 范育新. 频率分布曲线和概率累积曲线在沉积物粒度数据分析中应用的对比[J]. 甘肃地质, 2010, 19(2): 32-37.
Fan Tianlai, Fan Yuxin. Comparison of the application of frequency distribution curves and probability cumulative curves in sediment grain size data analysis[J]. Gansu Geology, 2010, 19(2): 32-37.
 - [7] 董续舒. 粒度分析在沉积岩中的应用[J]. 西部资源, 2021(4): 4-5, 8.
Dong Xushu. The application of particle size analysis in sedimentary rocks[J]. Western Resources, 2021(4): 4-5, 8.
 - [8] 刘增乾, 沈敢富, 李兴振. 三江地区金矿床成矿系列与找矿前景[J]. 四川地质学报, 1992(S1): 61-62.
Liu Zengqian, Shen Ganfu, Li Xingzhen. The metallogenic series and prospecting prospect of gold deposits in Sanjiang Area[J]. Acta Geologica Sichuan, 1992(S1): 61-62.
 - [9] 罗建宁, 陈成生, 郑来临, 等. “三江”地区主要沉积地质事件及其与邻区的对比[C]//青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社, 1991: 201-208.
Luo Jianning, Chen Chengsheng, Zheng Lailin, et al. Major sedimentary geological events in the San Jiang region and their comparison with neighboring areas[C]//Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 201-208.
 - [10] 张锦让, 温汉捷, 裴愉卓, 等. 兰坪盆地西缘沉积岩容矿脉状 Cu-Ag-Pb-Zn 多金属矿床成矿时代[J]. 高校地质学报, 2016, 22(2): 219-230.
Zhang Jinrang, Wen Hanjie, Qiu Yuzhuo, et al. The metallogenic age of the sedimentary rock-hosted vein Cu-Ag-Pb-Zn polymetallic deposit in the western margin of Lanping Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(2): 219-230.
 - [11] 张洪瑞, 杨天南, 侯增谦, 等. 三江北段东莫扎抓矿区构造变形特征[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1145-1155.
Zhang Hongrui, Yang Tiannan, Hou Zengqian, et al. Structural deformation characteristics of Dongmohazhua mining area in the northern section of Sanjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(4): 1145-1155.
 - [12] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 36-44.
Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, et al. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping Basin, Western Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(1): 36-44.
 - [13] 牟传龙, 王剑, 余谦, 等. 兰坪中新生代沉积盆地演化[J]. 矿物岩石, 1999(3): 30-36.
Mou Chuanlong, Wang Jian, Yu Qian, et al. Evolution of Mesozoic-Cenozoic sedimentary basins in Lanping[J]. Mineralogy and Petrology, 1999(3): 30-36.
 - [14] 何龙清, 季玮, 陈开旭, 等. 滇西兰坪盆地白秧坪地区东矿带推覆构造的控矿作用[J]. 地质力学学报, 2007(2): 110-118.
He Longqing, Ji Wei, Chen Kaixu, et al. The ore-controlling effect of the nappe structure in the eastern ore belt of Baiyangping Area, Lanping Basin, Western Yunnan[J]. Journal of Geomechanics, 2007(2): 110-118.
 - [15] 徐颖超, 全亚博, 王恒, 等. 青藏高原东南缘兰坪—思茅盆地反 S 型构造属性的古地磁约束[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 549-567.
Xu Yingchao, Tong Yabo, Wang Heng, et al. Paleomagnetic constraints on the anti-S-type tectonic attributes of the Lanping-Simao Basin on the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Review, 2017, 63(3): 549-567.
 - [16] 朱志军, 郭福生, 宋玉财, 等. 滇西兰坪盆地古近系构造——沉积演化与成矿关系[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 997-1006.
Zhu Zhijun, Guo Fusheng, Song Yucai, et al. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and mineralization of Paleogene in Lanping Basin, Western Yunnan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 997-1006.
 - [17] 薛力鹏, 薛传东, 刘靖坤, 等. 兰坪金顶跑马坪铅锌矿床的三维地质结构与控矿构造[J]. 岩石学报, 2022, 38(11): 3531-3541.
Xue Lipeng, Xue Chuandong, Liu Jingkun, et al. 3D geological architecture and ore-controlling structures of the Paomaping Zn-Pb deposit at the Jinding ore field, Lanping County, SE Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(11): 3531-3541.
 - [18] 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 等. 云南金顶超大型铅锌矿床碳、氧、锶、铅同位素地球化学[J]. 地球化学, 2013, 42(5): 467-480.
Tang Yongyong, Bi Xianwu, Wu Liyan, et al. Carbon, oxygen, strontium and lead isotope geochemistry of the Jinding super-large lead-zinc deposit in Yunnan[J]. Geochimica, 2013, 42(5): 467-480.
 - [19] 张洪瑞, 侯增谦. 大陆碰撞成矿作用: 深部动力学机制与成矿[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(6): 525-536.
Zhang Hongrui, Hou Zengqian. Continental collision mineralization: deep dynamic mechanism and mineralization[J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science), 2023, 46(6): 525-536.
 - [20] 冯志强, 郭建秋, 阮林森, 等. 兰坪盆地古近系宝相寺组层序

- 地层分析[J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(1): 103-108.
- Feng Zhiqiang, Guo Jianqiu, Ruan Linsen, et al. Sequence stratigraphic analysis of Paleogene Baoxiangsi Formation in Lanping Basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(1): 103-108.
- [21] 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 等. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3): 355-380.
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, et al. The basic characteristics and genetic types of ‘Sanjiang’ Himalayan sedimentary rock-hosted base metal deposits[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(3): 355-380.
- [22] 刘靖坤, 薛传东, 王维, 等. 金顶超大型铅锌矿床稀散金属Cd、Tl的矿化富集规律及地质意义[J]. 岩石学报, 2025, 41(2): 642-656.
- Liu Jingkun, Xue Chuandong, Wang Wei, et al. The mineralization enrichment law and geological significance of scattered metals Cd and Tl in Jinding super-large lead-zinc deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2025, 41(2): 642-656.
- [23] 曾普胜, 李红, 李延河, 等. 亚洲最大铅锌矿——三阶段叠加成矿的金顶巨型铅锌矿床[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2384-2398.
- Zeng Pusheng, Li Hong, Li Yanhe, et al. The largest lead-zinc deposit in Asia is the Jinding giant lead-zinc deposit with three-stage superimposed mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2384-2398.
- [24] 郑燕, 李维峰. 沉积学粒度分析方法在石油地质中的应用[J]. 冶金管理, 2021(19): 110-111, 120.
- Zheng Yan, Li Weifeng. Application of sedimentological grain size analysis methods in petroleum geology[J]. China Steel Focus, 2021(19): 110-111, 120.
- [25] 张杰, 宋永文. 粒度分析方法及其在辨别沉积环境中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(8): 45, 74.
- Zhang Jie, Song Yongwen. Grain size analysis methods and their application in identifying sedimentary environments[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2016(8): 45, 74.
- [26] 陈秀法, 冯秀丽, 刘冬雁, 等. 激光粒度分析与传统粒度分析方法相关对比[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(4): 608-614.
- Chen Xiufa, Feng Xiuli, Liu Dongyan, et al. Comparison between laser particle size analysis and traditional particle size analysis methods[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2002, 32(4): 608-614.
- [27] 郭超, 蒙红卫, 马玉珍, 等. 藏南羊卓雍错沉积物元素地球化学记录的过去 2000 年环境变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1345-1362.
- Guo Chao, Meng Hongwei, Ma Yuzhen, et al. Environmental changes in the past 2000 years recorded by elemental geochemistry of sediments from Yamdrok Tso, Southern Tibet[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1345-1362.
- [28] 王思琦, 游龙彪, 邢玉忠, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组细粒沉积岩岩相特征及沉积成因[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(36): 15388-15404.
- Wang Siqi, You Longbiao, Xing Yuzhong, et al. Sedimentary lithofacies characteristics and sedimentary origin in Qingshankou Formation of Gulong Depression in Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(36): 15388-15404.
- [29] 赵少攀, 王利康, 宗宇姮, 等. 晚更新世末期 郑州西部沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(25): 10571-10578.
- Zhao Shaopan, Wang Likang, Zong Yuheng, et al. Grain size characteristics of sediments in western Zhengzhou during Late Pleistocene and their environmental significance[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(25): 10571-10578.
- [30] 杨志浩, 姚宗全, 汪勇, 等. 准噶尔盆地南缘大龙口剖面二叠系梧桐沟组沉积相剖析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1338-1348.
- Yang Zhihao, Yao Zongquan, Wang Yong, et al. Sedimentary phase analysis of the Permian Wutonggou Formation in the Dalongkou section of the southern Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1338-1348.
- [31] 宗宇姮, 毕志伟, 杨振京, 等. 晚更新世末期白洋淀南部沉积物粒度特征及环境意义[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(26): 11081-11091.
- Zong Yuheng, Bi Zhiwei, Yang Zhenjing, et al. Grain size characteristics and environmental significance of sediments in the southern Baiyangdian area during the late Pleistocene[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(26): 11081-11091.
- [32] 张智超, 冷伟, 平建华, 等. 黄河下游原阳段沉积物粒度特征与沉积环境分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3177-3189.
- Zhang Zhichao, Leng Wei, Ping Jianhua, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment of sediments in Yuanyang section of the Lower Yellow River[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(8): 3177-3189.
- [33] 朱志军, 郭福生, 刘腾, 等. 云南兰坪盆地古近系细碎屑岩地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(6): 1631-1641.
- Zhu Zhijun, Guo Fusheng, Liu Teng, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Paleogene fine clastic rocks in Lanping Basin, Yunnan Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2015, 45(6): 1631-1641.
- [34] 李敏, 颀永平. 不同沉积地球化学特征对沉积环境的指示意义[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(6): 41-43.
- Li Min, Jie Yongping. Indicative significance of different sedimentary geochemical characteristics to sedimentary environments[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(6): 41-43.
- [35] 安倩. 兰坪盆地古近纪沉积充填特征[D]. 南昌: 东华理工大学, 2015.
- An Qian. Depositional filling characteristics of Paleogene in Lanping basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2015.
- [36] 王德权, 刘建朝, 张海东, 等. 内蒙古浩尧尔忽洞高钾钙碱性花岗岩岩石成因及构造意义[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 25-32.
- Wang Dequan, Liu Jianchao, Zhang Haidong, et al. Petrogenesis and tectonic significance of high-K calc-alkaline granite in Haoyaoerhudong, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 25-32.
- [37] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [38] 范鹏飞, 廖志权, 李满根, 等. 稀土元素地球化学对湘东大富岭矿床铀成矿的指示意义[J]. 科学技术与工程, 2025, 25

- (5): 1792-1802.
- Fan Pengfei, Liao Zhiqun, Li Mangen, et al. Geochemical characteristics of REE as indicators for uranium metallogenesis in the Dafuling deposit in eastern Hunan Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(5): 1792-1802.
- [39] 胡俭, 王海, 杨帆, 等. 陕北典型矿区烧变岩岩石学及地球化学特征[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(23): 9737-9745.
- Hu Jian, Wang Hai, Yang Fan, et al. Petrology and geochemical characteristics of burnt rocks in typical mining areas in northern Shaanxi[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(23): 9737-9745.
- [40] 黄光辉, 刘平辉, 江文剑, 等. 巴音戈壁盆地地下白垩统巴音戈壁组上段地球化学特征及地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(11): 4335-4344.
- Huang Guanghui, Liu Pinghui, Jiang Wenjian, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the upper section of the Lower Cretaceous Bayin Gebi Formation in Bayin Gebi Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(11): 4335-4344.
- [41] 饶耕玮, 刘晓东, 刘平辉, 等. 二连盆地川井坳陷白垩系地层元素地球化学特征及地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(8): 3023-3031.
- Rao Gengwei, Liu Xiaodong, Liu Pinghui, et al. Geochemical characteristics and geological significance of cretaceous strata elements in Chuanjing Depression, Erlian Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(8): 3023-3031.
- [42] Henderson P. Rare earth elements geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [43] 邓平. 微量元素在油气勘探中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 1993(1): 27-32.
- Deng Ping. Application of trace elements in oil and gas exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993(1): 27-32.
- [44] 陶树, 汤达帛, 周传祎, 等. 川东南—黔中及其周边地区下组合烃源岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J]. *中国地质* 2009, 36(2): 397-403.
- Tao Shu, Tang Dazhen, Zhou Chuanyi, et al. Element geochemical characteristics and sedimentary environment significance of source rocks in the lower assemblage of southeast Sichuan-central Guizhou and its surrounding areas[J]. *Geology in China*, 2009, 36(2): 397-403.
- [45] 苗耀, 桑树勋, 陈世悦, 等. 济阳坳陷石炭二叠系暗色泥岩微量元素赋存特征及其地质意义[J]. *地球化学*, 2009, 38(1): 57-67.
- Miao Yao, Sang Shuxun, Chen Shiyue, et al. Occurrence characteristics and geological significance of trace elements in Carboniferous-Permian dark mudstone in Jiyang Depression[J]. *Geochimica*, 2009, 38(1): 57-67.
- [46] 王兴, 田景春, 林小兵, 等. 渝东地区五峰组—龙马溪组沉积环境及有机质主控因素分析——以接龙剖面为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(1): 309-323.
- Wang Xing, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Analysis of sedimentary environment and main controlling factors of organic matter in Wufeng Formation-Longmaxi Formation in eastern Chongqing area-taking Jielong section as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(1): 309-323.
- [47] 徐银波, 孙平昌, 李昭, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔地区二叠系芦草沟组油页岩地球化学特征与成矿条件[J]. *中国地质*, 2022, 49(1): 311-323.
- Xu Yinbo, Sun Pingchang, Li Zhao, et al. Geochemical characteristics and metallogenic conditions of Permian Lucaogou Formation oil shale in Jimsar Area, Junggar Basin[J]. *Geology in China*, 2022, 49(1): 311-323.
- [48] 苗建宇, 周立发, 邓昆, 等. 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩地球化学与沉积环境的关系[J]. *中国地质*, 2004, 31(4): 424-430.
- Miao Jianyu, Zhou Lifa, Deng Kun, et al. Relationship between geochemistry of permian source rocks and sedimentary environments in the turpan depression[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 424-430.
- [49] 徐凯, 马江波, 成战刚, 等. 滇东会泽地区下寒武统渔户村组沉积地球化学特征与古环境重建[J]. *沉积学报*, 2025, 43(2): 668-682.
- Xu Kai, Ma Jiangbo, Cheng Zhangang, et al. Sedimentary geochemical characteristics and paleoenvironmental reconstruction of the Lower Cambrian Yuhucun Formation in Huize Area, Eastern Yunnan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(2): 668-682.
- [50] 刘金, 王剑, 谭静强, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积古环境与有机质富集[J]. *地质力学学报*, 2023, 29(5): 631-647.
- Liu Jin, Wang Jian, Tan Jingqiang, et al. The sedimentary paleoenvironment and organic matter enrichment of Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. *Journal of Geomechanics*, 2023, 29(5): 631-647.
- [51] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic Greywackes and Mudrocks: province and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [52] 刘伟, 王振奇, 叶琳, 等. 渤海湾盆地渤中坳陷沙一段与沙三段古湖泊水体分层新证据[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(10): 1428-1436.
- Liu Wei, Wang Zhenqi, Ye Lin, et al. New evidence for water stratification of ancient lakes in the first and third members of the Shahe Formation in the Bozhong Depression of the Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(10): 1428-1436.
- [53] 陈洪达, 李向东. 基于砂岩地球化学特征判别大地构造环境的方法综述[J]. *化工矿物与加工*, 2022, 51(10): 39-44.
- Chen Hongda, Li Xiangdong. A summary of approaches to discrimination of tectonic environment based on geochemical characteristics of sandstone[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022, 51(10): 39-44.
- [54] 戴塔根, 吴湘滨, 胡斌, 等. 澜沧江断裂中段雪山河变质岩群的岩石学特征及地质意义[J]. *中国地质*, 2002(3): 297-300.
- Dai Tagen, Wu Xiangbin, Hu Bin, et al. The petrological characteristics and geological significance of Xueshanhe metamorphic rock group in the middle section of Lancang River fault[J]. *Geology in China*, 2002(3): 297-300.
- [55] 王鹏, 郭嘉, 张潇, 等. 大兴安岭南段西沙拉地区流纹岩地层归属及构造背景[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(14): 5745-5755.
- Wang Peng, Guo Jia, Zhang Xiao, et al. Stratum affiliation and tectonic setting of rhyolite in Xishala Area, southern part of Great Xing'an Rang[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(14): 5745-5755.
- [56] 何碧, 赵振琯, 刘海生, 等. 东天山造山带黑尖山地区花岗岩闪

- 长岩岩石成因及构造意义; 来自岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学证据[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10620-10634.
- He Bi, Zhao Zhenguan, Liu Haisheng, et al. Petrogenesis and tectonic significance of late devonian granodiorite in Heijinshan Area, Eastern Tianshan orogenic belt: evidences from petrology, zircon U-Pb geochronology, and geochemistry[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10620-10634.
- [57] 李研, 聂逢君, 严兆彬, 等. 辽宁中沟地区条痕状花岗岩地球化学特征、构造背景及岩石成因意义[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9758-9766.
- Li Yan, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, et al. Geochemical characteristics, tectonic setting and petrogenetic significance of striated granites in Zhonggou area, Liaoning[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9758-9766.
- [58] Albarède C J, Minster J F. Quantitative models of trace-element behavior in magmatic processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38(3): 197-214.
- [59] 王国茹, 陈洪德, 朱志军, 等. 川东南—湘西地区志留系小河坝组砂岩稀土元素特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 487-495.
- Wang Guoru, Chen Hongde, Zhu Zhijun, et al. The characteristics and geological implications of rare earth elements in sandstone of lower silurian Xiaoheba Formation in The Southeastern Sichuan-Western Hunan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 487-495.
- [60] Garzanti E, Padoan M, Setti M, et al. Weathering geochemistry and Sr-Nd fingerprints of equatorial upper Nile and conglomerates[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013, 14(2): 292-316.
- [61] 张云望, 金鑫, 乔培军, 等. 鄂尔多斯盆地东北部下侏罗统富县组沉积物源分析——来自榆林安崖剖面砂岩的岩石学及元素地球化学证据[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1414-1429.
- Zhang Yunwang, Jin Xin, Qiao Peijun, et al. Sedimentary source analysis of the Lower Jurassic Fuxian Formation in the northeastern Ordos Basin-petrological and elemental geochemical evidence from sandstones in the Anya Section of Yulin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1414-1429.
- [62] 周元发, 王腾飞, 周维维. 沉积型磷质岩粒度特征及其指示意义——以云南镇雄县羊场磷矿为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(3): 758-774.
- Zhou Yuanfa, Wang Tengfei, Zhou Weiwei. Grain size characteristics of sedimentary phosphate rock and its indicative significance——a case study of Yangchang Phosphate Mine in Zhenxiong County, Yunnan Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(3): 758-774.
- [63] 刘宝珺, 曾允孚. 沉积岩石学[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 1991: 156-160.
- Liu Baojun, Zeng Yunfu. Sedimentary petrology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 156-160.
- [64] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 第四版. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [65] 曾胜强, 王剑, 冯兴雷, 等. 北羌塘盆地沃若山地区中—下侏罗统雀莫错组一段沉积环境分析[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 162-172.
- Zeng Shengqiang, Wang Jian, Feng Xinglei, et al. Sedimentary environment analysis of the first member of Middle-Lower Jurassic Quemocuo Formation in Woruoshan Area, Northern Qiangtang Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 162-172.
- [66] 刘茜雅, 王海兵, 左合君, 等. 库布齐沙漠沉积物粒度及其对沉积环境的指示意义[J]. 中国沙漠, 2024, 44(6): 240-248.
- Liu Xiya, Wang Haibing, Zuo Hejun, et al. Grain size of sediments in Kubuqi Desert and its indicative significance to sedimentary environment[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(6): 240-248.
- [67] 段志明, 钟成全, 朱华平, 等. 南羌塘盆地羌资-2 井中侏罗统色哇组和布曲组沉积特征[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 355-365.
- Duan Zhiming, Zhong Chengquan, Zhu Huaping, et al. Sedimentary characteristics of the Middle Jurassic Sewa Formation and Buqu Formation in Well Qiangzi-2, South Qiangtang Basin[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 355-365.