



移动阅读

霍勤知, 徐磊, 白云来, 等, 2025. 南秦岭北带三叠纪盆地古气候、古海洋、古环境演化研究[J]. 沉积与特提斯地质, 45(1): 14–30. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09003)

HUO Q Z, XU L, BAI Y L, et al., 2025. Study on paleoclimatic, paleoceanic, and paleoenvironmental evolution of the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(1): 14–30. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09003)

南秦岭北带三叠纪盆地古气候、古海洋、古环境演化研究

霍勤知¹, 徐磊¹, 白云来², 刘明³

(1. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国石油勘探开发研究院(西北分院), 甘肃 兰州 730030;
3. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 在野外地质调查工作基础上, 开展露头剖面沉积相研究, 结合粒度分析结果, 划分沉积相类型, 通过砂岩样品主量元素、微量元素分析, 碳酸盐岩 C-O 同位素分析, 探讨三叠系盆地古气候、古海洋、古环境演化过程。结果表明: (1) 研究区三叠系自下而上发育下统扎里山组、马拉松多组浅海环境开阔台地相碳酸盐岩(盆地南部)和隆务河组半深海环境斜坡相深水砂岩, 中统郭家山组浅海陆棚相和光盖山组半深海环境陆棚斜坡相沉积, 以及上统大河坝组浅海陆棚环境沉积; (2) 砂岩样品化学蚀变指数(CIA)值、成分变化指数(ICV)值, 以及 Rb/Sr-K₂O/Al₂O₃ 关系图解表明, 研究区三叠系经历了两次“温暖湿润—半干旱、干旱”的古气候演化过程, 并造成古水深相应的两期由深变浅的过程, 以及砂岩沉积水体盐度的变化, 温暖湿润气候带来的降水使得海水盐度大幅度降低, 而炎热的半干旱、干旱气候条件使得海水盐度大幅度升高; (3) 研究区三叠系砂岩形成于氧化—弱氧化的古水体环境, 这种环境虽有利于水生生物的发展繁盛, 能够为沉积有机质奠定物质基础, 却不利于沉积有机质的保存。

关键词: 南秦岭北带; 三叠纪盆地; 古气候; 古海洋; 古环境

中图分类号: P595

文献标识码: A

Study on paleoclimatic, paleoceanic, and paleoenvironmental evolution of the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

HUO Qinzhi¹, XU Lei¹, BAI Yunlai², LIU Ming³

(1. Gansu Provincial Geological Survey Institute, Lanzhou 730000, China; 2. PetroChina Research Institute of Exploration and Development (Northwest Branch), Lanzhou 730030, China; 3. Xi'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710100, China)

Abstract: On the basis of field geological investigations, the sedimentary facies of outcrops were studied, and sedimentary facies types were classified based on the results of particle size analysis. Additionally, through major and trace element analyses of sandstone samples, and C-O isotope analysis of carbonate rocks, the process of paleoclimatic, paleoceanic, and paleoenvironmental evolution in the Triassic basin was discussed. The results show that: (1) From bottom to top, the Triassic strata in the study area consist of open platform carbonate rocks of the Lower Triassic Zhalishan Formation and Malasongduo Formation in the southern part of the basin, semi-deep sea slope facies of the Longwuhe Formation, shallow marine shelf facies of the Middle Triassic Guojiaoshan Formation, semi-deep sea shelf slope facies of the Guanggaishan Formation, and shallow marine shelf facies of the Upper Triassic Daheba Formation; (2) Values of the chemical index of alteration (CIA), index of compositional variability (ICV), and the

收稿日期: 2023-03-15; 改回日期: 2024-09-13; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 万友利

作者简介: 霍勤知(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事基础地质和矿产地质调查研究工作。E-mail: 312833375@qq.com

资助项目: 中国地质调查局项目(2017-01-15-02-02)

relationship between Rb/Sr and K_2O/Al_2O_3 ratios in sandstone samples indicate that the Triassic period in the study area experienced two major paleoclimatic shifts: from warm and humid to semi-arid and arid conditions, which caused changes in the paleobasin's water depth, fluctuating from deeper to shallower stages, and influenced the salinity of the water. The precipitation brought by the warm and humid climate greatly reduced the salinity of seawater, while the hot semi-arid and arid climate greatly increased the salinity of seawater. (3) The paleowater body developed in the Triassic sandstone in the study area presents a weakly oxidizing environment, which is conducive to the development and flourishing of aquatic organisms. This environment provided a basis for the formation of sedimentary organic matter, though it was not ideal for the preservation of sedimentary organic matter due to the oxidizing conditions.

Key words: northern belt of the South Qinling; Triassic basin; palaeoclimate; paleoceanography; palaeoenvironment

0 引言

三叠纪海相地层是秦岭印支造山带的重要组成部分,构成了整个西秦岭的主体,并真实记录着特提斯域北东端对印支运动的沉积响应历史。近年来,在三叠纪盆地内部还发现大量金、汞、锑等多金属矿产。因此,针对西秦岭三叠系海相地层,就古气候、古海洋、古环境演化等方面开展深入研究,不仅对揭示特提斯域北东端对印支运动的沉积响应具有重要理论意义,也对深入推进新一轮找矿突破战略行动,保障国家能源资源安全需求具有重要的现实意义。前人对秦岭及邻区三叠纪盆地性质、特征及构造演化开展了大量研究工作,特别是在三叠纪盆地地层划分(李永军, 1990; 沈松平, 1993; 童金南等, 2021)、沉积特征(殷鸿福等, 1992; 何海清, 1996)、沉积相(Bouma, 2000; Anne et al., 2004; 殷鸿福和赖旭龙, 1991; 晋慧娟和李育慈, 2001)、沉积环境(赵江天和杨逢清, 1991)及盆地演化(赖旭龙等, 1992; 江新胜等, 1996; 李永军等, 2003; 韩学坤, 2020)等方面取得丰硕成果。然而,关于三叠系盆地古气候、古海洋、古环境演化方面研究的匮乏,制约了人们对印支运动在特提斯域北东端的构造改造过程和沉积响应的深入理解,也严重阻碍了对与印支运动有关的沉积矿产富集机理与分布规律的认识。鉴于此,本次研究在野外地质调查工作的基础上,开展露头剖面沉积相研究并采集样品,通过粒度分析、主量元素及微量元素分析、碳酸盐岩 C-O 同位素分析,探讨三叠系盆地古气候、古海洋、古环境演化过程,以期对特提斯域北东端重大地质事件研究提供理论参考,为沉积矿产勘查提供地质依据。

1 区域地质背景

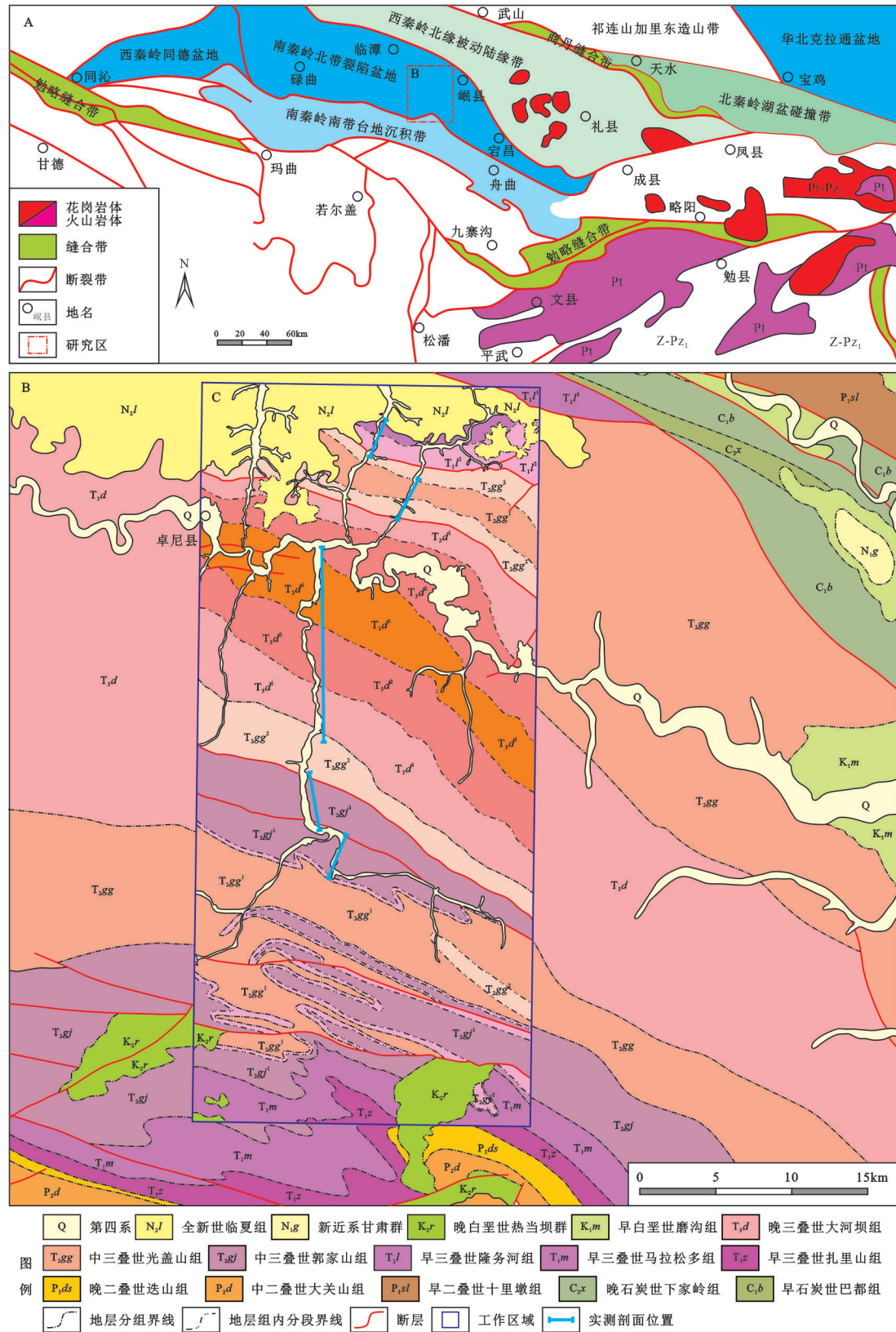
研究区位处南秦岭北带裂陷盆地中东部,该盆

地北邻西秦岭北缘被动陆缘带,南接南秦岭南带台地沉积带,西与西秦岭同德盆地共同构成西秦岭造山带印支期裂陷盆地(图 1A)。受印支运动控制,南秦岭北带三叠纪盆地整体经历了早中三叠世印度阶—安尼阶伸展阶段和拉丁阶—卡尼阶挤压阶段。早中三叠世印度阶—安尼阶,盆地整体处于伸展背景下,大致经历了初始拗陷、早期裂陷、中期裂陷和晚期裂陷 4 个构造活动阶段。印度阶,盆地南部晚二叠世以来的浅海碳酸盐岩台地北侧开始发生大面积拗陷(冯益民等, 2003),但仍处于稳定的浅海碳酸盐岩台地的沉积环境,发育了扎里山组(T_1z)碳酸盐岩沉积建造;奥伦尼阶晚期,盆地南部发育马拉松多组(T_1m)碳酸盐岩沉积,在盆地中、北部发育了隆务河组(T_1l)碎屑岩沉积。其后安尼阶、拉丁阶早中期,地层统一为中三叠统郭家山组(T_2gj)、光盖山组(T_2gg)(图 1B-C)。中三叠世拉丁阶晚期至晚三叠世卡尼阶,秦岭古地理格局发生重大转变,盆地由东向西逐渐闭合,褶皱回返造山,于晚三叠世后闭合成陆,该时期发育了上三叠统大河坝组(T_3d)(图 1B-C)。

2 样品采集与测试方法

2.1 样品采集

本次工作在 1:25 万区域地质调查基础上,开展卓尼—纳杂地区 1:5 万区域地质调查 3 幅联测,自北向南,系统地测制了卓尼县张旗村下三叠统隆务河组(T_1l)、威旗中三叠统光盖山组(T_2gg)、大峪沟中三叠统郭家山组(T_2gj)和上三叠统大河坝组(T_3d)等剖面(图 1C),同时对盆地南部(图幅外)腊子口乡美路沟下三叠统扎里山组(T_1z)和马拉松多组(T_1m)剖面进行测制,共采集样品 40 件。在对 40 件样品进行薄片鉴定的基础上,选择具有代表性的碎屑岩样品 11 件用于粒度分析、主量元素和



A. 区域构造图（据裴先治等修改，2002）；B. 1：25 万区域地质图；C. 本次工作开展的 3 幅联测 1：5 万区域地质图

图 1 研究区位置及三叠系地层分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of Triassic stratigraphy

微量元素分析,选择具有代表性的碳酸盐岩样品 7 件用于 C-O 同位素分析。

2.2 实验方法

薄片鉴定由中国地质调查局西安矿产资源调查中心(原武警黄金部队第五支队)实验室完成,采用莱卡 DM2500P 偏光显微镜进行薄片鉴定和照相。粒度分析由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,采用薄片显微镜镜下分析方法,用 Friedman (1958, 1962)提出的粒度回归校正方程 $D=0.3815+0.9027d$,以消除切片效应。式中 D 为校正后的筛析粒径, d 为薄片上测定的视长径,定义其单位为粒径 ϕ ,校正后的平均粒径最大偏差不超过 $1/4\phi$ 。并用显微镜测至 7ϕ ,测定或估算杂基含量,取杂基含量值的 $2/3\sim 1/2$ 为校正值(Δ),将各累计频率乘以 $(100-\Delta)$,重新用 Grapher 4.0 软件绘制概率累计曲线,取累计曲线上颗粒含量 1% 和 50% 处对应的粒径作为样品 C 值和 M 值,投点到 $C-M$ 图版上。

主量元素和微量元素分析在中国地质调查局西安矿产资源调查中心进行,先将挑选出的样品磨细至 200 目,在 105°C 烘干 3 h,转移至干燥器中冷却至室温,然后精确称取 0.70 g 和硼酸锂($\text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_7$)混合溶剂 7.00 g 于熔炉中制成玻璃样片,采用 Axios-X 射线荧光光谱仪(Panalytical)进行主量元素测试,精度优于 3%;将 0.1 g 干燥后样品进行洗盐处理后,精确称取 40 mg 加入 1:10 的 HF-HNO_3 混合溶液,密封加热至 180°C 恒温 24 h,随后敞口蒸干,加入去离子水和 HNO_3 各 1 ml,在 180°C 回溶 12 h,用 2% 的 HNO_3 定容至 80 g,置于 4°C 环境恒温保存,采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS(iCAP Q)进行微量元素分析,精度优于 5%。碳酸盐岩 C-O 同位素分析在中科院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心的 MAT253 同位素质谱分析仪上完成,分析方法见文献(黄擎宇等, 2014; 万友利等, 2018),采用纯磷酸法制备 CO_2 ,结果采用 PDB(Pee Dee Belemnite)和 SMOW(standard mean ocean water)标准,以 δ 值表示,检测依据行业标准 DZ/T0184.17—1997,分析误差为 $\pm 0.0005\%$ 。

3 沉积相分析

3.1 岩性组合及基本层序

盆地北部下三叠统隆务河组主要为一套碎屑浊流沉积,野外剖面可识别鲍马序列的 b、c、d 段

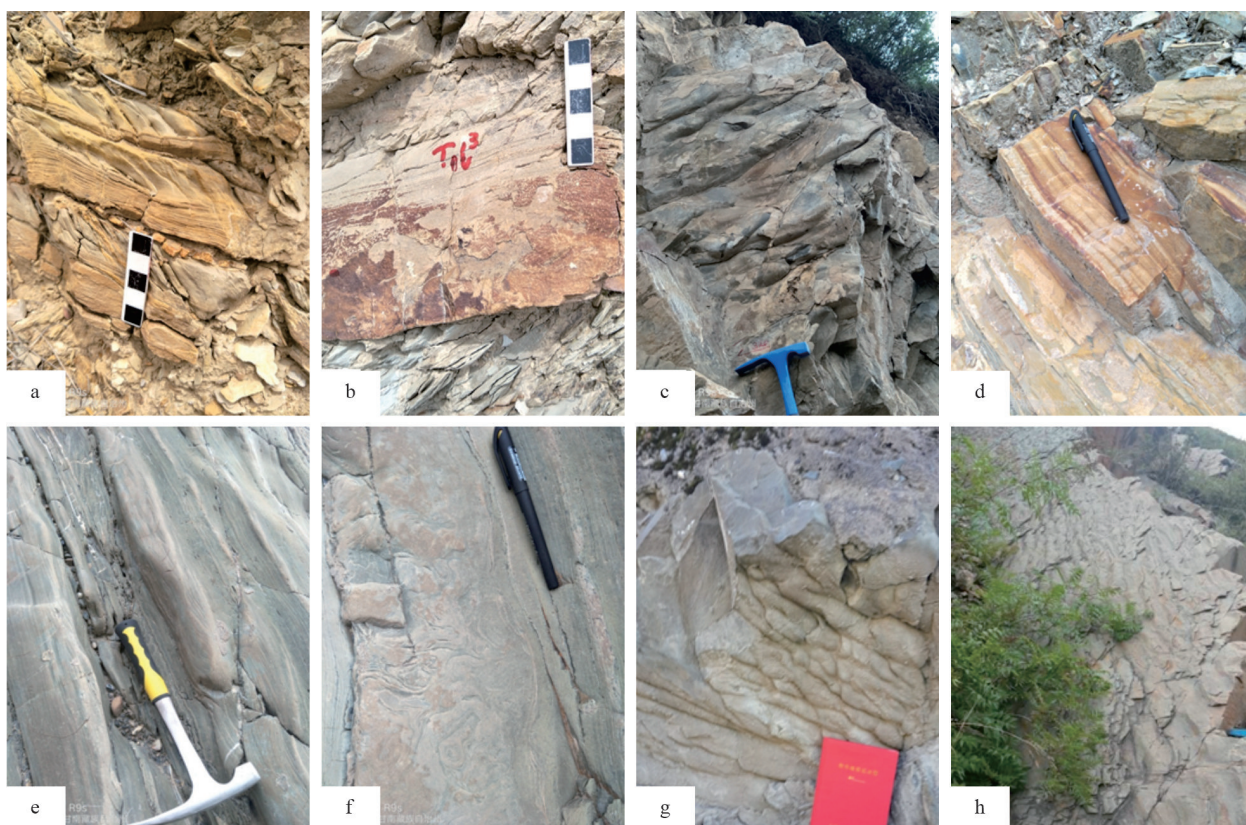
(图 2a),局部可见鲍马序列 a、b、c、e 段(图 2b),岩性组合包括隆务河组一段的泥晶—微晶灰岩、粉砂岩、板岩夹岩屑(长石)砂岩和二段的岩屑砂岩、粉砂岩、板岩,发育三种类型的基本层序(图 3a)。盆地南部下三叠统自下而上,扎里山组岩性组合为微粉晶灰岩、内碎屑灰岩,含角砾(竹叶状)粉晶灰岩,夹板岩、含生物碎屑灰岩、鲕粒碎屑灰岩,发育三种类型基本层序(图 3b);马拉松多组岩性组合为微晶灰岩、板岩,夹角砾状灰岩,见水平层理、沙纹层理和重荷模等沉积构造,发育四种类型的基本层序(图 3c)。

中三叠统郭家山组为一套细碎屑岩、碳酸盐岩建造,岩性组合为板岩、粉砂岩,薄层微晶灰岩,角砾状灰岩,偶夹长石石英砂岩,鲕粒灰岩、微晶灰岩。灰岩常呈楔状、透镜状,具滑塌沉积特征,底面见槽模(图 2c)、重荷模,砂岩见平行层理(图 2d),板岩中具水平纹层,发育 4 种类型的基本层序(图 3d)。中三叠统光盖山组总体以碎屑岩为主,夹少量碳酸盐岩,其中光盖山组一段以岩屑长石砂岩、粉砂岩、板岩为主,夹薄层微晶灰岩;二段以岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩为主,夹薄层状钙质板岩、钙质粉砂质板岩。在沉积构造上,光盖山组具有明显的半深海浊流岩特点,鲍马序列 b、c、d 段最为发育,见粒序层理、水平层理(图 2e)、交错层理、包卷层理(图 2f)、爬升沙纹层理、波状层理等,部分砂体底部见砾石等水道滞留沉积,少量砂体中发育透镜状层理,砂体底部见槽模、冲刷模和重荷模等层面构造,发育三种类型的基本层序(图 3e)。

上三叠统大河坝组为一套陆源碎屑岩沉积,剖面上可分为三段,一段岩性为岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩、板岩,夹灰岩透镜体、泥砾或砂球等;二段岩性为板岩、长石砂岩,偶夹薄层状泥灰岩,发育平行层理、斜层理、交错层理、透镜状层理、波状层理,砂岩中含泥砾;三段岩性为粉砂岩、板岩、长石砂岩,含碳质泥砾,层面见碳化植物碎片,发育粒序层理、包卷层理、交错层理,砂岩底面发育重荷模、槽模(图 2g),层面见波痕(图 2h),可能为不完全的风暴沉积序列组成类复理式建造。大河坝组发育三种类型的基本层序(图 3f)。

3.2 沉积相类型

受印支运动影响,研究区三叠世在继承晚二叠世沉积构造格局的基础上,下三叠统扎里山组沉积



a. 下三叠统隆务河组中鲍马序列 b、c、d 段；b. 下三叠统隆务河组中鲍马序列 a、b、c、e 段；c. 中三叠统郭家山组灰岩底部槽模构造；d. 中三叠统郭家山组砂岩中发育的平行层理；e. 中三叠统光盖山组砂岩中发育的粒序层理、平行层理；f. 中三叠统光盖山组粉砂岩中发育的包卷层理；g. 上三叠统大河坝组砂岩底部发育的印模构造；h. 上三叠统大河坝组砂岩顶面发育的波痕

图2 南秦岭北带三叠系盆地野外剖面典型沉积构造照片

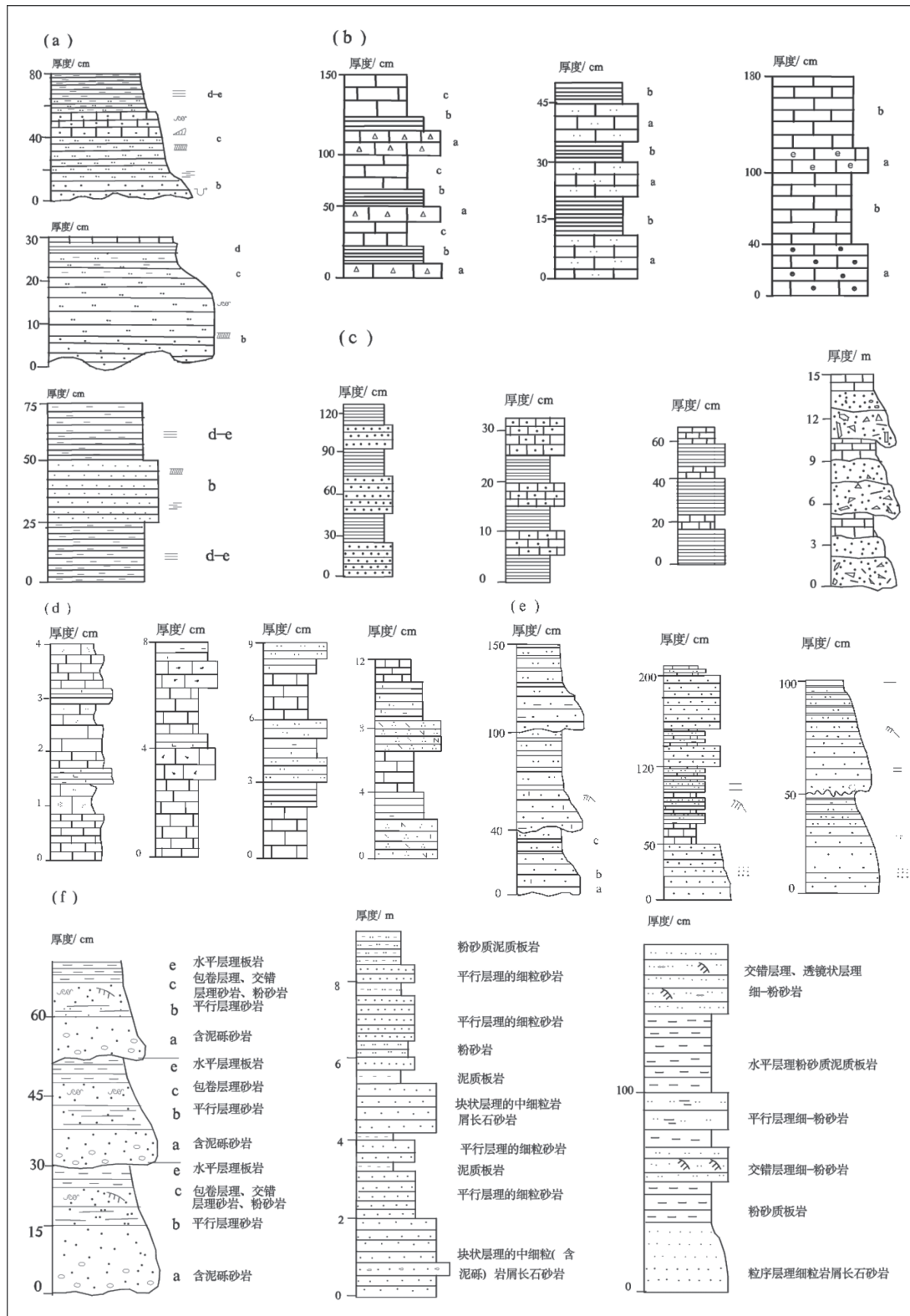
Fig. 2 Photos of typical sedimentary structures from field sections of the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

期(印度阶),盆地南部发生初始拗陷,发育浅海环境开阔台地相碳酸盐岩。随后碳酸盐岩开阔台地北侧开始进入早期裂陷扩展阶段(奥伦尼阶晚期),在盆地南部发育的马拉松多组仍为浅海环境开阔台地相碳酸盐岩,在盆地北部发育的隆务河组为深海—半深海(浊流)相复理石沉积。至郭家山组沉积期(安尼阶),受南部中秦岭海盆进一步扩张的影响,南秦岭北带地壳因均衡作用稍有回返,形成浅海陆棚环境,该组岩层中夹有较多的角砾状灰岩透镜体或条带,表明该时期相对海平面升降变化频繁。至拉丁阶早—中期,盆地进入晚期裂陷扩展阶段,活动性大为增强,经历了几次不同规模的裂陷,造成光盖山组中碎屑流、重力流活动记录频繁,规模较大(无热液活动),但盆地仍以半深海缺氧欠补偿环境为主。拉丁阶晚期—卡尼阶早期,即大河坝组沉积期,盆地动力学背景转化,在原扩展的基础上,

骤然挤压抬升,大河坝组以浅海陆棚环境沉积为主,该时期也预示着秦岭三叠系海盆开始闭合回返,至卡尼阶早期,随着盆地内挤压应力明显增强,盆地进入抬升萎缩阶段,此时大河坝组上段受风暴影响越发明显(图4)。

4 粒度分析结果

隆务河组下部沉积物以细粒组分为主,在概率累计曲线上反映其具有以跳跃总体为主的“牵引—跳跃—悬浮”三段式结构(图5b),跳跃总体含量约55%,分选较差,S截点 ϕ 值为2.25,T截点 ϕ 值为0.35,具有明显的浊流沉积特点;隆务河组上部以中—细粒组分为主,频率曲线图(图5a)反映碎屑物质分选中等偏差,粒度范围宽,其粒度范围在 $1.25\phi \sim 5.75\phi$ 之间,以细粒、细粒—中粒结构为主,在概率累计曲线图(图5b)上反映其具以跳跃总体



a. 下三叠统隆务河组发育的3种基本层序均与鲍马序列有关; b. 下三叠统扎里山组碳酸盐岩地层中3种基本层序类型; c. 下三叠统马拉松多组发育的4种基本层序类型; d. 中三叠统郭家山组发育的4种基本层序类型; e. 中三叠统光盖山组发育的3种基本层序类型; f. 上三叠统大河坝组发育的3种基本层序类型

图3 南秦岭北带盆地三叠系地层中岩性组合及基本层序

Fig. 3 Lithologic association and basic sequences of the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

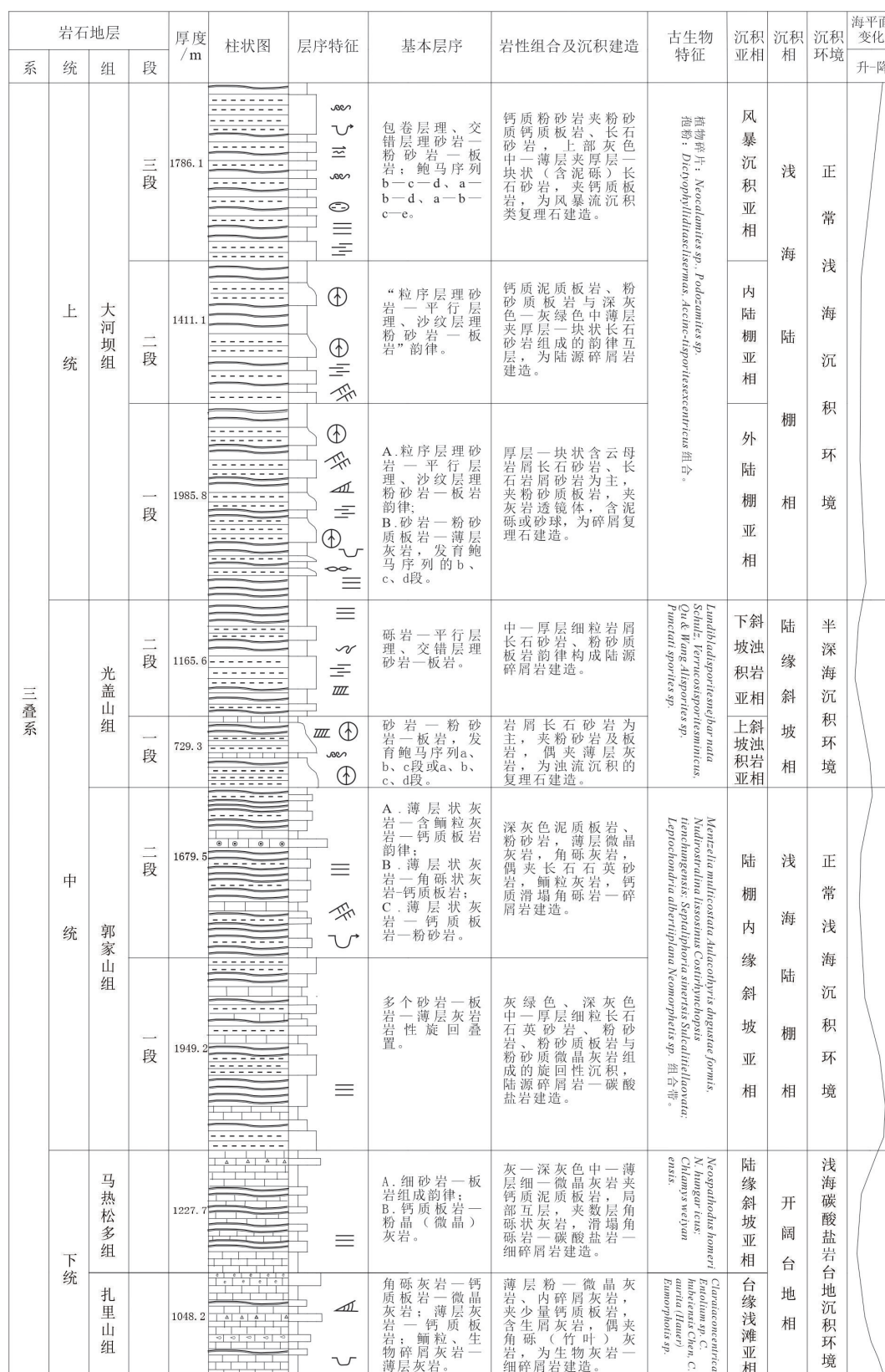


图 4 南秦岭北带盆地三叠纪地层沉积综合柱状图 (中南部)

Fig. 4 Comprehensive stratigraphic and sedimentary column of the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling (central south part)

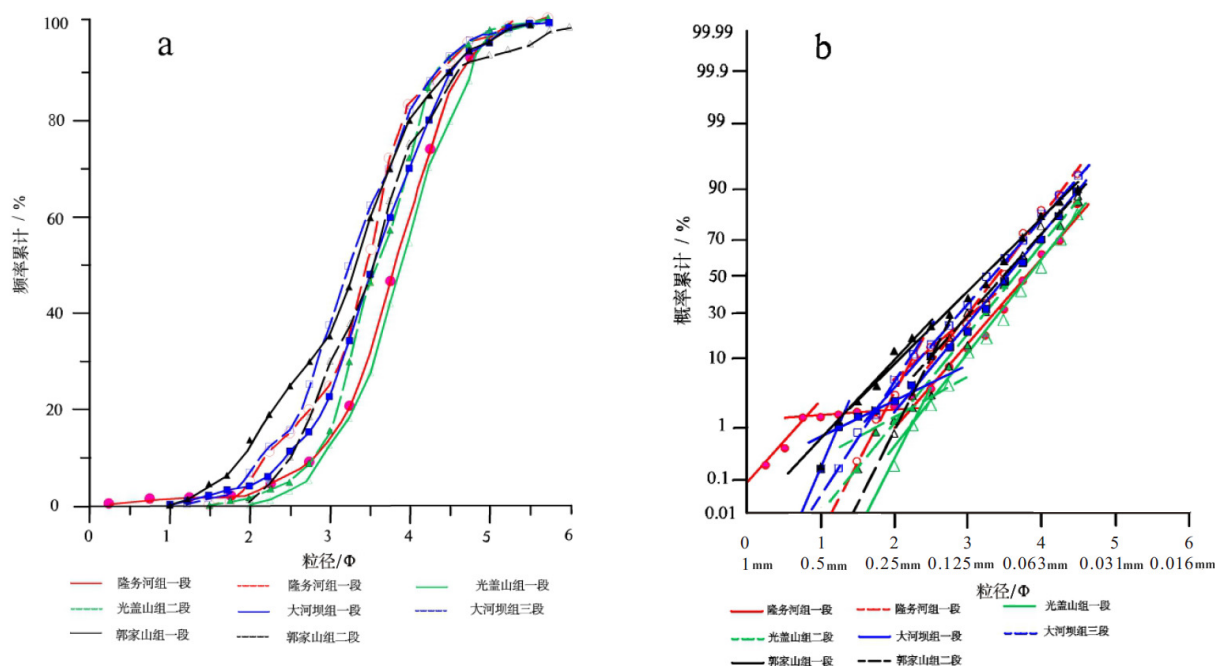


图5 南秦岭北带盆地三叠系碎屑岩粒度分析频率曲线图 (a) 及概率累计曲线图 (b)

Fig. 5 The frequency (a) and probability (b) cumulative curves of Triassic clastic rocks in the northern belt of the South Qinling

为主“悬浮-跳跃”二段式结构, 跳跃总体含量较高, S 截点 ϕ 值为 3.75, T 截点 ϕ 值为 2.25。这些特征共同反映隆务河组沉积物具备半深海浊流沉积特点。郭家山组以中—细粒为主, 在频率曲线图(图 5a)上反映碎屑物质分选中等, 曲线较缓, 粒度范围中等, 以细粒—中粒结构为主, 可能为浅海陆棚环境沉积, 在概率累计曲线图(图 5b)上表现为以“跳跃-悬浮”总体为主的“牵引-跳跃”二段式结构, 跳跃总体含量较高, S 截点 ϕ 值为 2.55, T 截点 ϕ 值为 1.15, 可能为浅海陆棚环境沉积产物。光盖山组沉积物粒度变化较大, 频率曲线图(图 5a)反映碎屑物质分选较好, 粒度范围较宽, 曲线较陡, 以细粒为主, 反映半深海环境下斜坡浊流沉积特点; 概率累计曲线图(图 5b)表明其具以跳跃-悬浮总体为主的“跳跃-悬浮”一段或二段式结构, 具有明显的浊流沉积特点。大河坝组沉积物粒度变化较大, 频率曲线图(图 5a)反映其碎屑物质分选较好, 曲线较陡, 粒度范围较窄, 以细粒为主; 概率累计曲线图(图 5b)反映其具以跳跃-悬浮总体为主的“跳跃-悬浮”二段式和“牵引-跳跃-悬浮”三段式结构, 沉积物粒度较细, 分选较好, 既有浅海陆棚沉积物性质, 同时具有类复理石浊积岩性质, 可能还存在风暴流沉积作用。

将 11 个样品粒度分析结果投在帕塞加牵引流综合 C-M 图(图 6a)上, 多数落入 V 和 VII 区, 即悬浮和滚动区(PQ 段)、递变悬浮区(QR 段)。帕塞加认为递变悬浮是受底部摩擦所引起的紊流控制的, 紊流愈强则悬浮的颗粒愈粗, 当紊流减弱时, 则开始了沉积作用。在浊流沉积 C-M 图(图 6b)上, 隆务河组 2 号样品、光盖山组 3、4 号样品和大河坝组 6 号样品落在 $C=M$ 基线上, 说明 C 值和 M 值呈明显的线性相关。由此也说明研究区隆务河组和光盖山组为典型的浊流沉积, 而大河坝组三段具有类似浊流沉积特征, 可能为风暴流沉积产物。

5 讨论

5.1 数据有效性分析

应用元素地球化学作为替代指标研究古气候和古环境时, 必须先对替代指标的有效性进行讨论。影响替代指标有效性的因素包括沉积物质的来源、沉积物质的粒度、沉积相等因素。

5.1.1 沉积物质的来源

利用地球化学指标重建古气候和古环境, 首先必须保证分析的沉积物是一次旋回沉积物(Suttner and Dutta, 1986; 冯兴雷等, 2018)。本次研究工作主要通过成分变化指数(index of compositional

variability, ICV) (计算公式为 $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + Ti_2O_3) / Al_2O_3$) 和 Th、Sc、Zr 等元素指标进行。

南秦岭北带三叠系砂岩的类型与其矿物成分有着密切关系。总体而言,三叠系砂岩中 SiO_2 含量较高,介于 51.99%~78.37% 之间,平均 63.48%,表明三叠系砂岩中石英或者富硅质矿物(如长石等)

含量较高,岩石的成分成熟度较高。通过 $SiO_2-Al_2O_3$ 图解(图 7)分析表明,南秦岭北带盆地三叠系砂岩中的 SiO_2 和 Al_2O_3 略呈负相关关系,矿物成分主要为钾长石和石英,黏土矿物含量相对较低;而黏土矿物含量较低的砂岩 ICV 值一般要比 1 大得多,这种砂岩经常作为第一次旋回的沉积物。本次研究获取的砂岩样品(表 1)ICV 值全部大于 1,介于

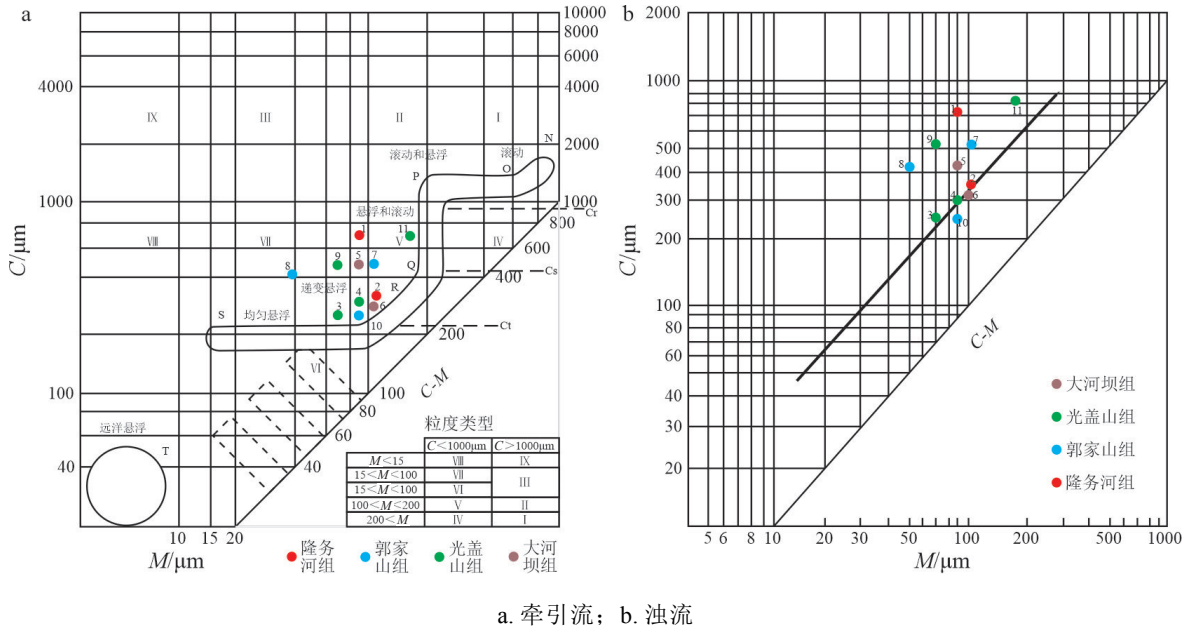


图 6 南秦岭北带盆地三叠系碎屑岩 $C-M$ 图

Fig. 6 $C-M$ diagram of clastic rocks from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

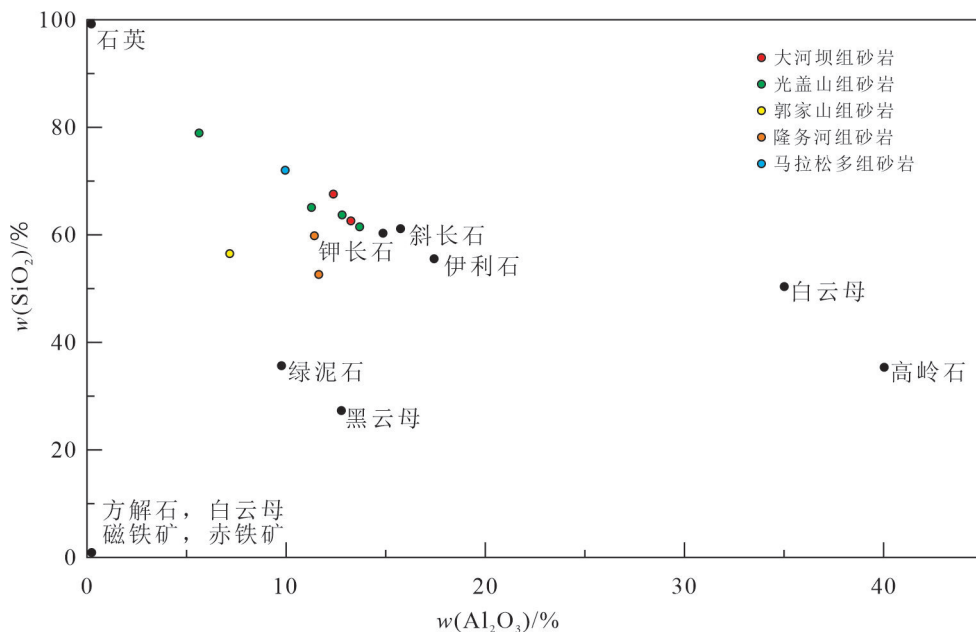


图 7 南秦岭北带盆地三叠系砂岩 $SiO_2-Al_2O_3$ 图解

Fig. 7 SiO_2 vs. Al_2O_3 diagram of sandstones from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

表 1 南秦岭北带盆地三叠系碎屑岩样品微量元素地球化学分析结果

Table 1 Geochemical analysis results of trace elements of Triassic clastic rock samples in the northern belt of the South Qinling

样品编号		PM105 -26YQ	PM104 -83YQ	HD0013 -YQ	HD0017 -YQ	PM104 -119YQ	HD0015 -YQ	HD0012 -YQ	PM103 -54YQ	PM103 -38YQ	LP303 -YQ
含量/%	SiO ₂	62.01	67.09	60.87	64.59	63.21	78.37	55.94	51.99	59.21	71.56
	Al ₂ O ₃	13.29	12.47	13.74	11.37	12.88	5.70	7.26	11.72	11.53	10.01
	TFe ₂ O ₃	6.38	5.82	6.60	5.50	6.04	3.80	2.90	5.87	5.17	5.55
	MgO	2.65	1.61	3.05	1.82	2.00	0.75	1.28	2.39	1.53	1.78
	CaO	4.25	3.21	3.90	4.93	4.66	4.54	15.48	10.71	8.46	2.98
	Na ₂ O	2.97	2.52	1.86	2.77	2.30	0.07	0.86	0.08	0.91	0.18
	K ₂ O	1.66	2.14	2.39	1.40	2.56	1.29	1.13	1.83	2.04	1.90
	TiO ₂	0.56	0.61	0.66	0.49	0.66	0.47	0.51	0.61	0.56	0.60
	MnO	0.08	0.05	0.05	0.09	0.07	0.05	0.06	0.11	0.07	0.05
	P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.14	0.13	0.17	0.11	0.14	0.16	0.14	0.14
含量/10 ⁻⁶	Rb	63.30	82.30	98.20	57.20	116.00	59.60	51.30	87.50	106.00	86.30
	Ba	220.00	260.00	259.00	211.00	406.00	307.00	204.00	228.00	588.00	255.00
	Th	8.12	11.00	11.60	8.61	13.90	9.33	11.00	12.20	10.60	11.20
	U	1.75	1.79	2.32	1.81	2.34	1.99	2.31	2.60	2.07	2.35
	K	13 780.47	17 723.67	19 815.65	11 597.18	21 260.11	10 684.01	9 388.98	15 191.72	16 951.63	15 739.62
	Ta	0.86	0.96	1.23	0.78	1.24	0.80	0.83	1.05	1.15	0.98
	Nb	12.60	12.90	17.00	11.20	16.50	11.10	11.50	15.30	15.30	13.70
	Sr	159.00	145.00	204.00	178.00	229.00	139.00	837.00	390.00	234.00	155.00
	P	584.34	671.55	606.14	575.62	732.60	466.60	623.59	697.72	623.59	601.78
	Zr	150.00	252.00	164.00	165.00	248.00	371.00	226.00	157.00	208.00	239.00
	Hf	4.33	7.62	4.80	4.59	7.79	10.10	6.58	4.26	5.82	6.62
	Ti	3 374.62	3 668.32	3 932.06	2 943.05	3 968.02	2 799.19	3 068.92	3 668.32	3 380.61	3 608.38
	Sc	9.21	8.72	13.30	8.82	10.30	5.28	5.55	10.60	10.30	9.43
	Co	17.50	9.64	18.00	12.10	12.20	6.35	7.57	11.70	10.80	14.10
	Cr	49.80	52.70	63.00	45.80	46.70	53.10	38.20	45.20	45.20	68.00
	Li	53.30	26.80	55.50	44.20	20.30	22.90	25.80	41.20	35.50	35.20
	Ni	28.80	20.40	33.80	21.90	20.70	18.90	16.70	23.00	18.70	33.00
	Pb	18.70	9.53	11.80	8.69	8.20	12.30	8.77	22.50	19.90	17.10
	V	59.30	61.30	90.30	58.70	66.50	43.50	45.80	63.60	63.10	71.00
相关指标	CIA	53.45	55.45	51.68	61.17	54.00	77.65	64.08	83.86	68.82	79.09
	ICV	1.95	1.93	2.09	1.86	1.68	2.58	5.05	2.75	2.35	1.66
	V/Cr	1.19	1.16	1.43	1.28	1.42	0.82	1.20	1.41	1.40	1.04
	Ni/Co	1.65	2.12	1.88	1.81	1.70	2.98	2.21	1.97	1.73	2.34
	V/(V+Ni)	0.67	0.75	0.73	0.73	0.76	0.70	0.73	0.73	0.77	0.68
	U/Th	0.22	0.16	0.20	0.21	0.17	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21

1.66~5.05 之间, 平均值为 2.39, 则进一步表明盆地三叠系砂岩碎屑沉积物为一次旋回沉积物。

此外, 沉积过程中水动力条件对沉积碎屑的分选和再循环将导致重矿物富集, 从而造成与重矿物有关的微量元素富集。通过 Th/Sc–Zr/Sc 图解分析(图 8), 所有样品均与碎屑成分演化线(BFG)接近, 样品成分主要受物源区母岩成分控制, 沉积分选和

再循环作用对其影响不大, 也表明砂岩碎屑成分为一次旋回沉积物。

5.1.2 沉积作用因素

沉积作用因素包括沉积环境和沉积分异作用控制的沉积物粒度、分选等。粒度和分选对沉积物的化学成分有相当大的影响(Korsch et al., 1993; Kiminami and Fujii, 2007, 冯兴雷等, 2018), 本次研

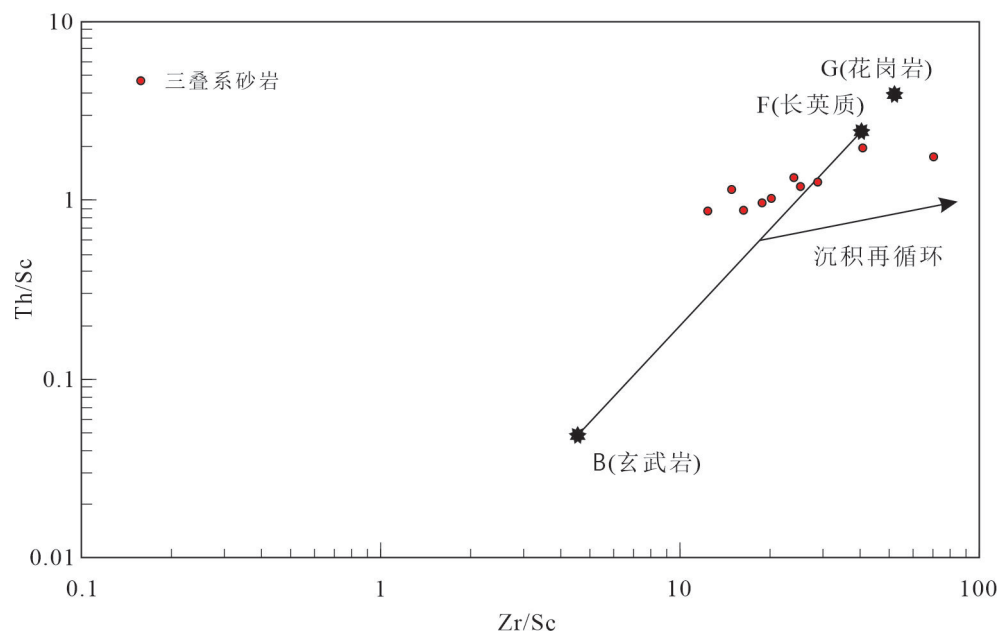


图 8 南秦岭北带盆地三叠系砂岩 Th/Sc–Zr/Sc 图解

Fig. 8 Th/Sc vs. Zr/Sc diagram of the sandstones from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

究的样品主要为粉—细砂岩, 因此, 为了更客观地评价碎屑颗粒粒径和分选对古气候和古环境的影响, 本文绘制了化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)值与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 交会图(图 9), 结果表明, 由于岩石分选和颗粒粒径差异, CIA 值也不尽相同(表 1), 但是 CIA 值整体处于 51.68~83.86 之间, 平均值 64.93, 总体上, CIA 值与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 之间缺乏相关性, 表明沉积物颗粒大小和分选对 CIA 值变化的影响可以不考虑。研究区三叠系碎

屑岩地层主要沉积在海相环境的下三叠统隆务河组至上三叠统大河坝组, 从半深海环境浊积砂岩到浅海陆棚环境砂岩均有发育, 不同地层间的 CIA 值变化频繁, 同一地层同一岩性段内 CIA 也呈不同的高低变化。因此, 沉积作用因素并不控制沉积物的 CIA 值。

5.2 古水深变化

沉积过程中发生的各种沉积分异作用(机械分异、化学分异和生物化学分异), 使得某些元素的

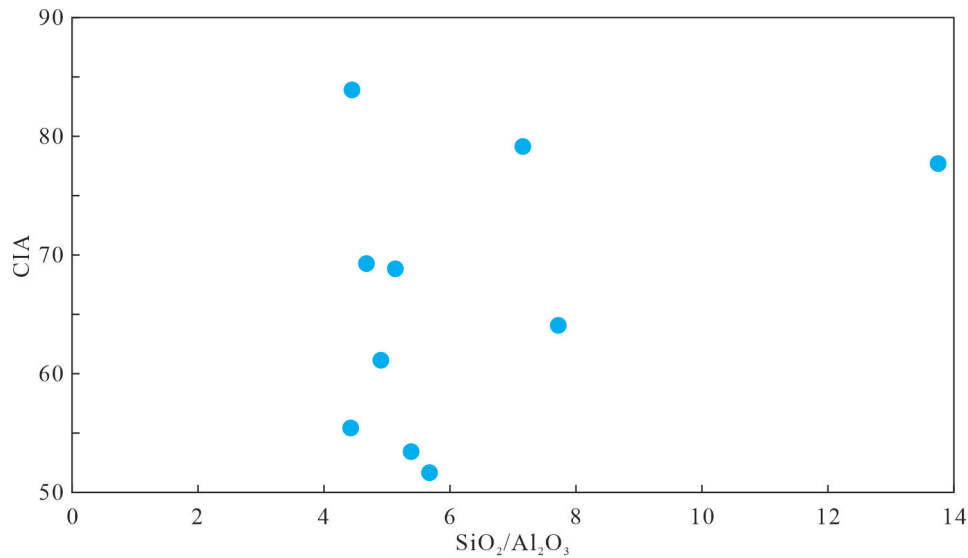


图 9 南秦岭北带盆地三叠系砂岩 CIA– $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解

Fig. 9 CIA vs. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of the sandstones from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

聚集或分散与水体深度存在一定的关系。前人依据由海岸向洋盆增加的距离,将某些元素作为特征元素,并按特征元素含量划分为 Fe 族元素(Fe、Cr、V、Ge)带、水解性元素(Al、Ti、Zr、Ga、Nb、Ta)带、亲硫元素(Pb、Zn、Cu、As)带和 Mn 族元素(Mn、Co、Ni、Mo)带,分别对应于海岸、浅海、半深海和深海(冯兴雷等, 2018)。

对三叠系碎屑岩样品的主量元素和微量元素进行综合分析,研究结果表明,所有样品中含量最高的均为水解性元素,其次为 Fe 族元素,而亲硫元素和 Mn 族元素含量最低,表明水体环境为海岸一半深海的沉积环境(图 10)。但这种判断不够细致,因此,本次采用 Fe 元素和 Mn 元素的特性进行深入研究。Fe 元素的氧化物常常在 pH 值 < 3 时溶解度最大,当开始进入海(湖)盆后,由于 pH 值的明显升高,其溶解度会突然大幅降低,常常在河口处有最大的富集;而在同样的环境中, Mn 相对 Fe 稳定。因此, Fe/Mn 比值的相关分析显示,隆务河组底部砂岩 Fe/Mn 比值较高,向上至隆务河组二段 Fe/Mn 比值降至最低值,表明隆务河组二段时期,

水体深度较一段增加,盆地北部沉积环境由三叠系盆地开启时的浅水环境快速变为深海一半深海环境。

向上至郭家山组, Fe/Mn 比值略有升高,说明水体深度略有减小,与沉积环境由半深海环境变为浅海陆棚环境一致。至光盖山组二段, Fe/Mn 比值快速升高至最大值,随后快速降低,表明至光盖山组一段沉积期,水体深度逐渐减小,光盖山组二段沉积期,水体深度快速减小,随后再次快速增大,可能与光盖山组沉积时,盆地活动性增强,局部发育的断陷造成短期强制性海退,水体深度快速降低有关。至大河坝组, Fe/Mn 比值相对较高,表明大河坝组沉积时,受挤压抬升控制,水体深度逐渐降低,但大河坝组三段出现 Fe/Mn 比值减小的现象,表明可能因遭受风暴潮影响,造成局部层段水体深度增大。

5.3 古气候变化

陆源碎屑沉积物中,因长石极易遭受大气淡水淋滤而降解,其降解过程主导了陆壳化学风化的过程,因此可用沉积物中主量元素含量的变化判断古气候变化(冯兴雷等, 2018)。在此过程中,长石矿物中的 Al 作为迁移惰性元素,多富集在风化残留

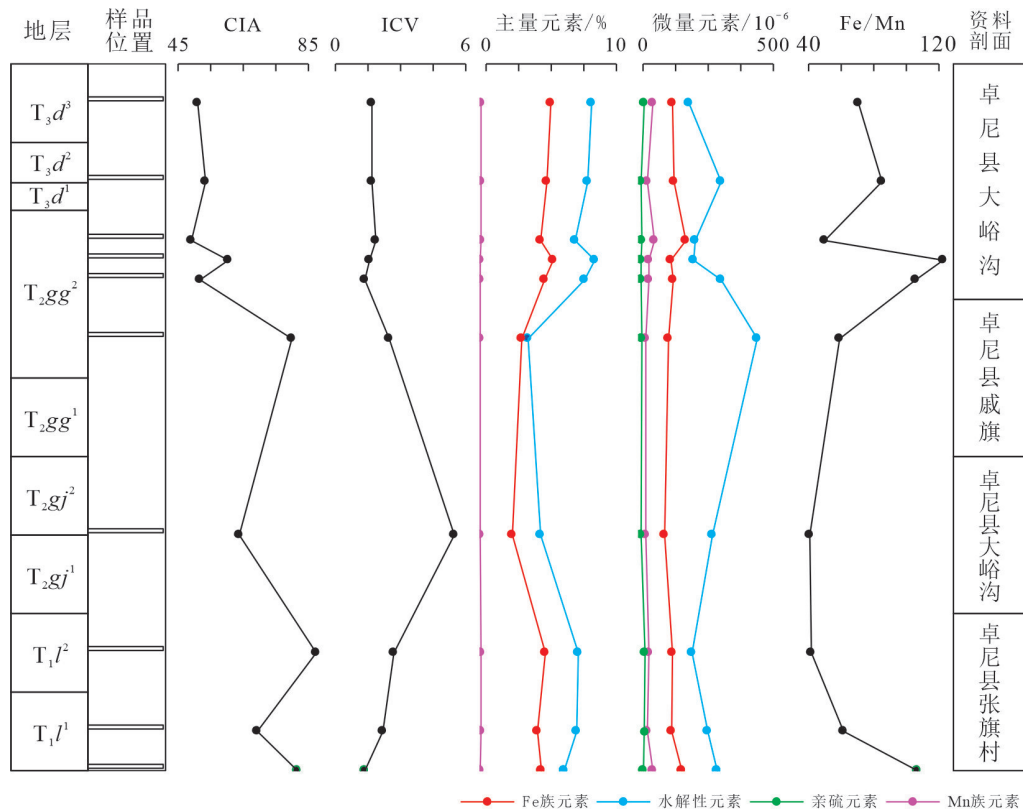


图 10 三叠系碎屑岩 CIA、ICV、Fe/Mn 比值、Fe 族元素、水解性元素、亲硫元素和 Mn 族元素含量分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of CIA, ICV, Fe/Mn ratios, contents of Fe-group elements, hydrolytic elements, sulfophilic elements, and Mn-group elements in Triassic clastic rocks

的渣状层中,甚至能够形成风化壳型铝土矿,而 Ca、Na 和 K 等迁移活跃元素遭受水体淋滤后在水体、土壤溶液中富集(Fedo et al., 1995)。该过程可用蚀变作用指标 CIA 值表征(Nesbitt and Young, 1982),随着 CIA 值增加,化学风化强度增大。 $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$, 其中,各种碱性矿物氧化以摩尔百分比表示, CaO 表示铝硅酸盐馏分中的 CaO 含量,采用 Fedo et al. (1997)提出的校正方法,当 CaO 含量大于 Na_2O 含量时,采用 Na_2O 含量代替 CaO 含量。此外,沉积物化学组分变异性指数(ICV)也可用来判断古气候的变化情况(Cox et al., 1995), ICV 值随着化学风化强度增加而减小(Sciscio and Bordy, 2016)。与 CIA 指标相比, ICV 指标考量了沉积物中 CaO 的所有来源,并且较少受到成岩改造的影响(Potter et al., 2005)。

砂岩样品 CIA 和 ICV 指标计算结果显示(表 1),研究区三叠系 CIA 值整体呈波动式降低趋势,从最高值 83.86 降低至 51.68,表明化学风化强度中等且逐渐降低,而 ICV 值则表现为隆务河组至郭家山组升高(ICV 值由 1.66 上升至 5.05),至光盖山组二段底部 ICV 值降低至 1.68,光盖山组顶部再次升高至 2.09,到大河坝组再次降低的波动特征。图 10 表明,隆务河组沉积期,风化作用强度较高,可能为相对温暖潮湿的气候;至郭家山组风化强度逐渐减弱,表明古气候逐渐变为半干旱甚至干冷气候;至光盖山组二段沉积初期,古气候回暖为半湿润气候;至光盖山组沉积末期,可能变为半干旱气候;至大河坝组沉积期,古气候变为半干旱—干热气候。

此外, Al、K、Rb 和 Sr 元素含量的波动也可作为古气候变化的记录。Rb/Sr 比值和 K_2O/Al_2O_3 比值已被广泛用作记录风化强度的替代指标。Al 主要与细晶硅铝酸盐含量有关,富集在与温暖潮湿气候相关的高岭石中(Hieronimus et al., 2001; Beckmann et al., 2005), K 和 Rb 与伊利石弱化学风化性质有关(Ratcliffe et al., 2010)。Sr 在湿热气候条件下,极易因淋滤溶解进入盆地沉积物中,从而使得湖相沉积物中 Rb/Sr 比值变小,而气候干冷时,降水量减少,从而使得湖相沉积物中 Rb/Sr 比值增大,但对海相沉积物来说,由于地表径流带来的淋滤溶解 Sr 相较于广阔的水域而言,影响甚微,即使在缺乏降水的季节,海水也可通过溶解海域内古老地层

获得 Sr 的来源。因此,富伊利石沉积物中应具有低 Rb/Sr 值和高 K_2O/Al_2O_3 比值,富高岭石沉积物中则具有高 Rb/Sr 比值和低 K_2O/Al_2O_3 比值。

研究结果表明,在 Rb/Sr- K_2O/Al_2O_3 交会图上(图 11),隆务河组 K_2O/Al_2O_3 值较低,而 Rb/Sr 值较高,表明砂岩中高岭石含量相对较高,形成于温暖湿润环境,碎屑沉积物遭受的化学风化作用相对强烈,而自下而上的变化趋势进一步表明化学风化作用逐渐减弱,至郭家山组沉积期, Rb/Sr 比值和 K_2O/Al_2O_3 比值均达最低值,指示半干旱甚至干冷气候。光盖山组沉积期, Rb/Sr 比值和 K_2O/Al_2O_3 比值表明砂岩中高岭石恢复较高含量,温暖湿润气候回归,至光盖山组沉积末期,气候逐渐变为炎热的半干旱、干旱气候。大河坝组沉积时,持续了炎热的半干旱、干旱气候,局部可能因风暴潮影响形成温暖湿润小气候特征。

5.4 古盐度变化

利用地球化学方法推断古盐度最常用的方法包括碳氧同位素经验公式法、硼法、元素比值法和沉积磷酸盐法等。本次研究虽开展了 7 件碳酸盐岩样品的碳氧同位素分析测试工作,采用公式 $Z = 2.048 \times (\delta^{13}C + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}O + 50)$ 计算,计算结果 Z 值均在 121.4~139.1 之间, Z 值均大于 120,为海相灰岩。但在复查样品时发现, 7 件样品中均或多或少混入了后期胶结的亮晶方解石脉体,不能代表原始海水的组成。因此,本次研究主要通过砂岩元素地球化学的 Sr/Ba、V/Ni、Rb/K、Fe/Mn 和 Mg/Ca 值的变化进行(韩永红等, 2007; 冯兴雷等, 2018)古盐度变化特征分析。

Sr 和 Ba 的化学性质相似,但在不同沉积环境中却以不同的地球化学行为发生分类,在自然界水体中, Sr 的迁移能力比 Ba 强,在水体盐度很低时, Sr 和 Ba 均以重碳酸盐的形式产出,当水体盐度增加时, Ba 首先以 $BaSO_4$ 的形式沉淀,留在水体中的 Sr 相对富集,水体盐度进一步增大, Sr 则以 $SrSO_4$ 形式递增沉淀。因此, $Sr/Ba < 1$, 为陆相沉积, $Sr/Ba > 1$, 为海相沉积。除隆务河组二段和郭家山组二段的样品 $Sr/Ba > 1$ 外,其余样品 Sr/Ba 值均介于 0.4~0.84 之间(图 12),单从实验结果看,为陆相—海陆过渡环境沉积。单独考察 Sr/Ba 值 < 0.5 的 2 件样品,隆务河组一段发育在温暖湿润古气候条件,光盖山组二段底部发育在古气候回归温暖湿润条件,这也可能预示着温暖湿润古气候条件下,

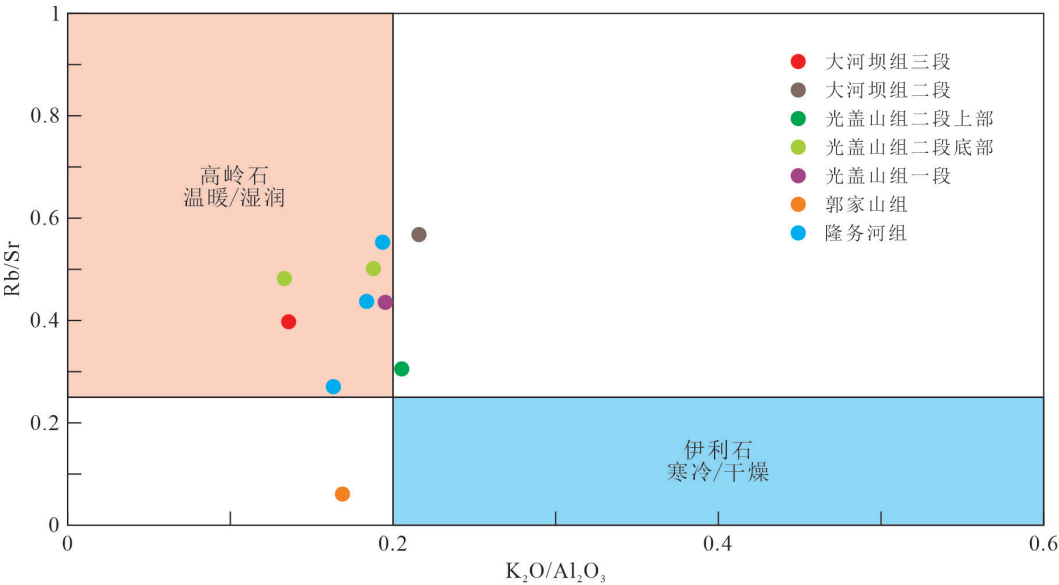


图 11 南秦岭北带三叠系盆地砂岩 Rb/Sr-K₂O/Al₂O₃ 关系图解

Fig. 11 Rb/Sr vs. K₂O/Al₂O₃ diagram of sandstones from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

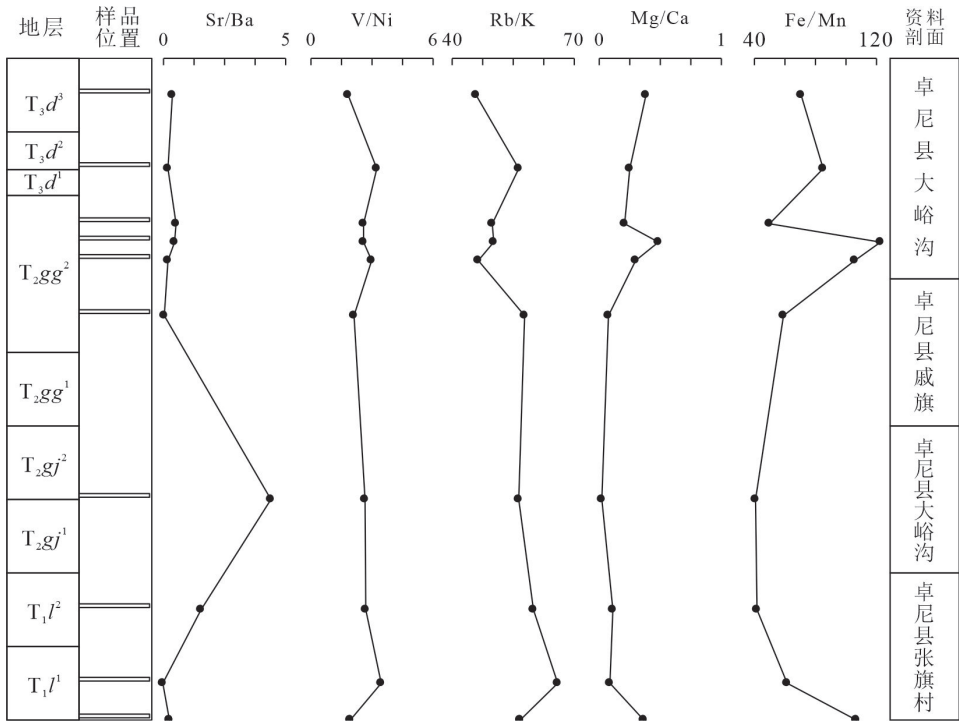


图 12 南秦岭北带三叠系盆地砂岩 Sr/Ba、V/Ni、Rb/K、Mg/Ca 和 Fe/Mn 比值分布特征

Fig. 12 Distribution of Sr/Ba, V/Ni, Rb/K, Mg/Ca and Fe/Mn ratios in sandstones from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling

充沛的降水降低了海水盐度,三叠系砂岩发育在低盐度海相—海陆过渡相环境。而郭家山组二段样品的 Sr/Ba 值高达 4.10,推测其发育于半干旱的古气候条件。

此外, V/Ni 值、Rb/K 值、Mg/Ca 值和 Fe/Mn 值

从三叠系底部隆务河组到顶部大河坝组的波动性变化过程,也印证了研究区三叠系沉积演化和古气候变化过程。V/Ni 值和 Rb/K 值由隆务河组一段底部到中部的快速增加,印证了隆务河组沉积环境由海陆过渡环境快速转变为海相环境,即水体深度

快速增加,而 Mg/Ca 值和 Fe/Mn 值的相应快速减小,表明该时期古海水盐度处于逐步增加的过程,即随着古海水深度逐渐增加,研究区古海水盐度受大气淡水影响逐渐降低。下三叠统隆务河组一段中部至中三叠统郭家山组, V/Ni 值、 Rb/K 值、 Mg/Ca 值和 Fe/Mn 值呈整体稳定、略有降低趋势,印证了该时期整体处于浅海环境,海水古盐度进一步增加,与该时期古气候由温暖湿润逐步变为半干旱有关。中三叠统郭家山组至光盖山组二段底部, Rb/K 值和 Mg/Ca 值仍保持整体稳定,但 V/Ni 值略有降低、 Fe/Mn 值略有上升,表明海水古盐度略有降低(冯兴雷等, 2018),在古水体深度快速降低背景下,则印证了该时期温暖湿润气候回归,降水降低了海水盐度。光盖山组二段, V/Ni 值和 Fe/Mn 值的变化过程表明古水体深度快速变浅后快速增加,相应 Rb/K 值、 Mg/Ca 值分别表现为快速减小再增大和快速增大再快速减小,印证了光盖山组二段沉积期,盆地活动性增强,在半湿润—半干旱古气候条件下,海水古盐度逐渐增大。上三叠统大河坝组, V/Ni 值逐渐降低、 Fe/Mn 值逐渐上升,表明海水古盐度是逐渐减小的。

5.5 古氧化还原环境判别

研究古水体的氧化还原条件对厘清石油基本地质条件十分重要,一方面关系到水体中是否富含足够支撑大量水生生物生存、繁衍、繁盛的氧气,从而奠定沉积有机质的物质来源,另一方面水体中的氧气含量还关系到沉积有机质的埋藏效率。 U 、 V 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Mo 等微量元素在氧化和还原条件下的溶解性差异,使其能够代表沉积时的原始记录,常作为判别古沉积水体氧化—还原环境指标(Jones and Manning, 1994; Algeo and Tribovillard, 2009)。其中, V 和 Ni 同属铁族元素, V 在氧化环境下容易与沉积物结合而形成沉淀,而 Ni 易于在还原条件下被吸附富集,因此,通常可用 $V/(V+Ni)$ 值反映古沉积水体的氧化—还原环境。 Th 和 U 的化学性质在还原环境下十分相似,但在氧化条件下差异甚大,基于 Th 和 U 两种元素的地球化学性质差异,也可用 δU 和 U/Th 值判断沉积环境的氧化还原状态。本次研究采用 V/Cr 、 Ni/Co 、 $V/(V+Ni)$ 和 U/Th 值,结合 Jones and Manning(1994)提出的古水体氧化—还原环境微量元素判别指标进行。

研究结果表明(图 13),研究区三叠系砂岩样

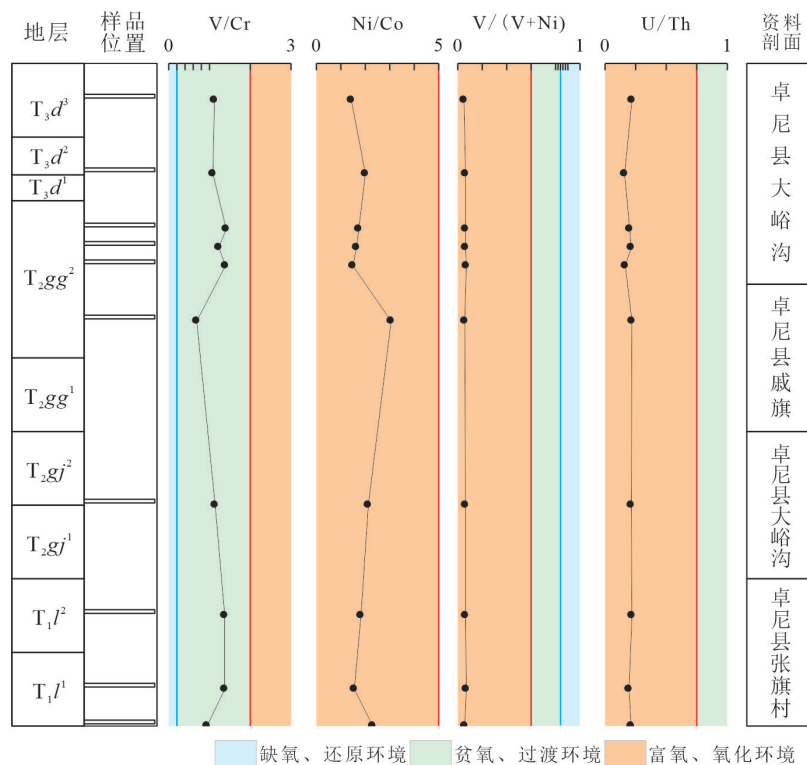


图 13 南秦岭北带三叠系盆地砂岩 V/Cr 、 Ni/Co 、 $V/(V+Ni)$ 和 U/Th 比值分布特征 (据 Jones and Manning, 1994)

Fig. 13 Distribution of V/Cr , Ni/Co , $V/(V+Ni)$, and U/Th ratios in sandstones from the Triassic basin in the northern belt of the South Qinling (according to Jones and Manning, 1994)

品的 V/Cr 值介于 0.82~1.43 之间, 平均为 1.24, 全部处于 0.2~2.0 的贫氧、过渡环境, 并且 V/Cr 值越大, 沉积古水体的氧化性越强。Ni/Co 值、V/(V+Ni) 值和 U/Th 值分别介于 1.65~2.98、0.67~0.77 和 0.16~0.22 之间, 平均值分别为 2.04、0.73 和 0.20, 全部处于富氧、氧化环境, 且比值越大, 沉积古水体的氧化性越强。结合野外地质调查工作, 研究区三叠系砂岩整体呈红褐色—灰绿色, 表明砂岩发育时水体为弱氧化—氧化环境。该环境为水生生物提供了充足的有氧环境, 有助于水生生物繁衍、兴盛, 也可在氧化环境中富集的沉积矿产提供了基本条件。通过 V/Cr 值和 Ni/Co 值研究三叠系砂岩古沉积水体氧化—还原环境的变化, 隆务河组开始沉积到一段中部, 古水体的氧化性逐渐增强, 可能与该时期温暖湿润气候下的降水携带大量氧气进入海水有关, 随着进入深海—半深海环境, 受降水影响程度降低, 沉积古水体的氧化性逐渐减弱, 但仍处于弱氧化—氧化环境。至中三叠统光盖山组二段沉积时, 古水体的氧化性再次增强, 则可能与古气候回暖有关。上三叠统大河坝组沉积时, 古水体氧化—还原性出现的轻微波动, 则可能是由于受到风暴潮的影响, 古水体中氧气含量增加所致。

6 结论

(1) 南秦岭北带三叠系盆地自下而上发育下三叠统扎里山组、马拉松多组浅海环境开阔台地相碳酸盐岩(盆地南部)和隆务河组半深海环境斜坡相深水砂岩, 中三叠统郭家山组浅海陆棚相和光盖山组具半深海环境陆棚斜坡相沉积, 以及上三叠统大河坝组浅海陆棚相沉积。

(2) 水解性元素、Fe 族元素和 Fe/Mn 比值的变化规律表明, 研究区三叠系的古水深经历了两期由深变浅的过程。隆务河组沉积时水体快速加深, 至郭家山组、光盖山组一段沉积时, 古水深逐渐变小, 光盖山组二段沉积时古水深快速变小后再快速增大, 大河坝组沉积期, 盆地古水体深度进一步减小直至盆地消亡。

(3) CIA 值、ICV 值和 Rb/Sr-K₂O/Al₂O₃ 关系图解表明, 三叠纪经历了两次“温暖湿润—半干旱、干旱”古气候演化过程。隆务河组沉积于温暖湿润环境, 郭家山组沉积时古气候变为半干旱甚至干冷, 光盖山组沉积时回归温暖湿润气候, 光盖山组沉积末期古气候再次变得干热, 大河坝组时延续了

炎热的半干旱—干旱气候。

(4) 砂岩样品 Sr 元素的相对匮乏和 Ba 的相对富集表明, 研究区三叠系碎屑岩主要发育在低盐度海相、海陆过渡相环境, 海相环境古盐度变化与古气候旋回性变化有关, 温暖湿润气候带来的降水使得海水盐度大幅度降低, 而炎热的半干旱、干旱气候条件使得海水盐度大幅度升高。

(5) 研究区三叠系碎屑岩发育的古水体呈氧化—弱氧化环境, 有利于水生生物的发展繁盛, 为沉积有机质奠定了物质基础, 但氧化—弱氧化的古水体环境不利于沉积有机质的保存。

References

- Algeo T J, Tribouillard N, 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. *Chemical Geology*, 268: 211–225.
- Anne G, Bruno S, David J W, et al., 2004. Present morphology and depositional architecture of a sandy confined submarine system: the Golo turbidite system (eastern margin of Corsica)[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 222 (1): 59–89.
- Beckmann B, Flögel S, Hofmann P, et al., 2005. Orbital forcing of Cretaceous river discharge in tropical Africa and ocean response[J]. *Nature*, 437: 241–244.
- Bouma A H, 2000. Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: Applicability and dangers[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2 (1): 137–143.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L, 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2919–2940.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M, 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23: 921–924.
- Fedo C M, Young G M, Nesbitt H W, 1997. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition[J]. *Precambrian Research*, 86: 210–223.
- Feng X L, Fu X G, Tan F W, et al., 2018. Sedimentary environments of the Upper Triassic Tumengela Formation in the Woruo Mountain area in the Qiangtang Basin, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38 (2): 3–13 (in Chinese with English abstract).
- Feng Y M, Cao X D, Zhang E P, et al., 2003. Tectonic evolution framework and nature of the west Qinling orogenic belt[J]. *Northwestern Geology*, 36 (1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Han X K, 2020. Sedimentary environment and basin evolution of Triassic Basin in West Qinling[J]. *World Nonferrous Metals* (6): 269–270 (in Chinese with English abstract).
- Han Y H, Wang H H, Chen Z H, et al., 2007. Paleosalinity analysis and trace element geochemistry of Chang 6 member in Gengwan-Shijiawan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 19 (4): 20–26 (in Chinese with English abstract).

- He H Q, 1996. Early Triassic sediments and their tectonic controlling factors, Western Qinling[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14 (1): 86 – 92 (in Chinese with English abstract).
- Hieronymus B, Kotschoubey B, Boulegue J, 2001. Gallium behavior in some contrasting lateritic profiles from Cameroon and Brazil[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 72: 147 – 163.
- Huang Q Y, Zhang S N, Meng X H, et al., 2014. Textural types and origin of the Cambrian–Ordovician dolomite in the Central Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32 (3): 537 – 549 (in Chinese with English abstract).
- Jones B, Manning D A C, 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111 (1–4): 111 – 129.
- Jiang X S, Pan G T, Yan Y J, et al., 1996. Triassic sedimentary framework and tectopaleogeographic evolution of the juncture of the Qinling, Qilian and Kunlun orogenic belts[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 16 (3): 204 – 208 (in Chinese with English abstract).
- Jin H J, Li Y C, 2001. A study on Middle Triassic flysch facies in west Qinling orogenic belt[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19 (3): 321 – 326 (in Chinese with English abstract).
- Kiminami K, Fujii K, 2007. The relationship between major element concentrations within sandstones from four turbidite sequences in Japan[J]. *Sedimentary Geology*, 195: 203 – 215.
- Korsch R J, Roser B P, Kamprad, 1993. Geochemical, petrographic and grain-size variations within single turbidite beds[J]. *Sedimentary Geology*, 83: 15 – 35.
- Lai X L, Yin H F, Yang F Q, 1992. The character and evolution of ecostratigraphy and paleobiogeography of Triassic Qinling basin[J]. *Earth Science*, 17 (3): 345 – 352 (in Chinese with English abstract).
- Li Y J, 1990. The stratigraphic division of the Triassic in the Minjiang river valley in the western Qinling mountains[J]. *Regional Geology of China* (2): 126 – 131 (in Chinese with English abstract).
- Li Y J, Zhao R F, Liu Z W, et al., 2003. Triassic sedimentation and basin evolution in the western Qinling[J]. *Geology in China*, 30 (3): 268 – 273 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H W, Young G M, 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715 – 717.
- Potter P E, Maynard J B, Depetis P J, 2005. Mud and Mudstones, Introduction and Overview[M]. Berlin Heidelberg: Springer: 157 – 174.
- Ratcliffe K T, Wright A M, Montgomery P, et al., 2010. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon Field, offshore Northwest Australia[J]. *Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal*, 50 (1): 371 – 388.
- Sciscio L, Bordy E M, 2016. Palaeoclimatic conditions in the Late assessment of the Elliot Formation[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 119: 102 – 119.
- Shen S P, 1992. The Triassic of the southern sub-belt of west Qinling[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 13 (1): 66 – 68 (in Chinese with English abstract).
- Suttner L J, Dutta P K, 1986. Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 329 – 345.
- Tong J N, Chu D L, Miao X, et al., 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Triassic in China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 45 (3): 340 – 363 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y L, Wang J, Fu X G, et al., 2018. The geochemical characteristics and mechanism of dolomite in the paleo-reservoir of Buqu Formation, south Qiangtang Basin, Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 45 (2): 129 – 141 (in Chinese with English abstract).
- Yin H F, Lai X L, 1991. Palaeogeographical characteristics of Triassic lithofacies in Qinling[J]. *Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry* (4): 246 – 247 (in Chinese with English abstract).
- Yin H F, Yang F Q, Huang Q S, et al., 1992. Triassic system of Qinling and adjacent areas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press.
- Zhao J T, Yang F Q, 1991. Early and Middle Triassic basin-slope environments in the Hezuo region, Gansu[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 11 (5): 27 – 34 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯兴雷, 付修根, 谭富文, 等, 2018. 羌塘盆地沃若山地区上三叠统土门格拉组烃源岩沉积环境分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 38 (2): 3 – 13.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等, 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. *西北地质*, 36 (1): 1 – 10.
- 韩学坤, 2020. 西秦岭三叠纪盆地的沉积环境及盆地演化研究[J]. *世界有色金属* (6): 269 – 270.
- 韩永红, 王海红, 陈志华, 等, 2007. 耿湾—史家湾地区长6段微量元素地球化学特征及古盐度分析[J]. *岩性油气藏*, 19 (4): 20 – 26.
- 何海清, 1996. 西秦岭早三叠世沉积特征及其构造控制作用[J]. *沉积学报*, 14 (1): 86 – 92.
- 黄擎宇, 张哨楠, 孟祥豪, 等, 2014. 塔里木盆地中央隆起区寒武奥陶系白云岩结构特征及成因探讨[J]. *沉积学报*, 2014, 32 (3): 537 – 549.
- 江新胜, 潘桂棠, 颜仰基, 等, 1996. 秦、祁、昆交接区三叠纪沉积相格架及构造古地理演化[J]. *四川地质学报*, 16 (3): 204 – 208.
- 晋慧娟, 李育慈, 2001. 西秦岭造山带中三叠统复理石相研究[J]. *沉积学报*, 19 (3): 321 – 326.
- 赖旭龙, 殷鸿福, 杨逢清, 1992. 秦岭三叠纪古海盆的生态地层、生物古地理特征及其演化[J]. *地球科学*, 17 (3): 345 – 352.
- 李永军, 1990. 西秦岭岷江流域三叠系的划分[J]. *中国区域地质*, (2): 126 – 131.
- 李永军, 赵仁夫, 刘志武, 等, 2003. 西秦岭三叠纪沉积盆地演化[J]. *中国地质*, 30 (3): 268 – 273.
- 沈松平, 1992. 西秦岭南亚带三叠纪地层研究[J]. *四川地质学报*, 13 (1): 66 – 68.
- 童金南, 楚道亮, 缪雪, 等, 2021. 中国三叠纪岩石地层划分和对比[J]. *地层学杂志*, 45 (3): 340 – 363.
- 万友利, 王剑, 付修根, 等, 2018. 羌塘盆地南部古油藏带布曲组白云岩地球化学特征及成因机制[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 45 (2): 129 – 141.
- 殷鸿福, 赖旭龙, 1991. 秦岭三叠纪岩相古地理特征[J]. *矿物岩石地球化学通报* (4): 246 – 247.
- 殷鸿福, 杨逢清, 黄其胜, 等, 1992. 秦岭及邻区三叠系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 赵江天, 杨逢清, 1991. 甘肃合作地区早、中三叠世盆地—斜坡沉积环境分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 11 (5): 27 – 34.