



豫西荥阳P?Tr之交孙家沟组沉积环境及古气候变化

郑伟, 刘云龙, 齐永安, 邢智峰, 李姝, 付玉鑫, 李婉颖, 许欣

引用本文:

郑伟, 刘云龙, 齐永安, 等. 豫西荥阳P?Tr之交孙家沟组沉积环境及古气候变化[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1128–1143.

ZHENG Wei, LIU YunLong, QI YongAn, et al. Sedimentary Environment and Paleoclimate Variations of the Sunjiagou Formation at the P–Tr Boundary in Xingyang Area, Western Henan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1128–1143.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

不同选择性提取方法锶钡比的海陆相沉积环境判别探讨——以现代黄河三角洲为例

Discrimination between Marine and Terrestrial Sedimentary Environments by the Selectively Extracted Sr/Ba Ratio: A case of sediments in the Yellow River Delta

沉积学报. 2020, 38(6): 1226–1238 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.118>

广丰盆地晚白垩世周田组红层沉积特征及古气候意义

Sedimentary Characteristics and Paleoclimatic Significance of the Late Cretaceous Zhoutian Formation Red Beds in the Guangfeng Basin

沉积学报. 2020, 38(3): 485–496 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.074>

辽东苏子河盆地聂尔库组沉积相与沉积环境研究

Study of Sedimentary Facies and Environment of the Nieerku Formation, Suzihe Basin, Eastern Liaoning

沉积学报. 2019, 37(1): 30–39 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.114>

新疆拜城新近系含铜岩系沉积体系及沉积环境

Sedimentary System and Depositional Environment of Copper-Bearing Rock Series of Neogene in Baicheng County, Xinjiang

沉积学报. 2015, 33(6): 1074–1086 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.002>

四川宣汉七里峡T3x/T2l界线沉积环境演化分析

The Analysis of Sedimentary Environmental Evolution of the T3x/T2l Boundary Transition in Qilixia of Xuanhan, Sichuan

沉积学报. 2015, 33(6): 1149–1158 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.008>

文章编号:1000-0550(2021)05-1128-16

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.059

豫西荥阳 P-Tr 之交孙家沟组沉积环境及古气候变化

郑伟^{1,2,3}, 刘云龙¹, 齐永安^{1,2,3}, 邢智峰^{1,2,3}, 李姐^{1,2,3}, 付玉鑫¹, 李婉颖¹, 许欣¹

1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454003

2. 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室, 河南焦作 454003

3. 中原经济区煤层气与页岩气协同创新中心, 河南焦作 454003

摘要 荥阳万山地区出露的孙家沟组陆源碎屑岩沉积, 保存了丰富的二叠纪—三叠纪之交陆相沉积记录, 有助于探究二叠纪末生物大灭绝事件前后陆相沉积环境和古气候的变化规律。在实测野外地质剖面的基础上, 结合传统岩性分析、粒度分析、沉积相分析和微量元素地球化学分析, 综合分析了研究区孙家沟组的沉积环境及其古气候变化特征。结果表明: 孙家沟组主要为早中期的河流沉积过渡为三角洲平原亚相和三角洲前缘亚相的陆相浅水富氧沉积环境; 孙家沟组沉积期的古气候主要为温暖湿润, 前期出现了几次干热变化, 且整个沉积期风化剧烈。

关键词 P-Tr之交; 孙家沟组; 陆相沉积环境; 古气候; 荥阳

第一作者简介 郑伟, 男, 1979年出生, 副教授, 遗迹学、沉积学、地球生物学, E-mail: zhengw99@hpu.edu.cn

通信作者 邢智峰, 女, 副教授, E-mail: xingzhifeng925@126.com

中图分类号 P532 P597 **文献标志码** A

0 引言

二叠纪—三叠纪之交发生的显生宙最大的生物灭绝事件, 致使海洋和陆地均发生了严重的生物危机^[1]。这一事件造就了早中三叠世特殊的生物类群结构和生态格局, 持续波动的异常环境条件致使二叠纪—三叠纪之交这一时期成为古、中生代之交突变生命期和环境的關鍵^[2-3]。许多学者对此开展大量的研究, 取得了众多研究成果^[4]。但是, 目前对大灭绝事件的研究大多是基于海相地层开展的, 且多是基于早三叠世生物复苏、微生物相关的沉积构造以及二叠系—三叠系界线等方面的研究, 而对这一特殊时期古气候、古环境和古地理变化对陆地生态系统影响方面的研究相对不多^[5-6], 特别是这一时期古气候变化对陆地的影响的相关研究还较少。豫西荥阳地区孙家沟组保存的二叠纪—三叠纪转折时期的陆相沉积记录^[7], 有助于探究二叠纪末生物大灭绝事件前后陆相沉积环境和古气候的变化规律, 对分析

二叠纪—三叠纪之交华北陆块南缘古气候的演化及其对二叠纪末生物大灭绝事件的影响具有重要意义。

本文通过对荥阳地区孙家沟组岩相特征、粒度特征和微量元素地球化学特征等方面的研究, 进行沉积环境和古气候变化分析, 试寻求研究区孙家沟组沉积环境和古气候演变特征, 为二叠纪—三叠纪之交陆相古气候变化研究提供资料。

1 区域地质概况

荥阳万山地区属于华北地层大区之晋冀鲁豫地层区嵩山小区, 位于华北板块板内区嵩箕构造区之嵩箕断隆内, 主要出露地层为上二叠统孙家沟组和下三叠统刘家沟组。晚二叠世孙家沟组沉积期华北板块海水退出, 南部隆起, 并转变为内陆湖盆^[8]。豫西地区发育了一套由细粒砂岩、粉砂岩和泥岩组合而成以红色碎屑岩建造为特征的沉积, 整体上属于河流—湖泊相^[9]。

收稿日期: 2020-03-31; **收修改稿日期**: 2020-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(41772110, 41102008, 41902113); 河南省山水地质旅游资源开发有限公司委托项目(H15-115); 河南省高等学校重点科研项目(20A170010)[**Foundation**: National Natural Science Foundation of China, No. 41772110, 41102008, 41902113; The Project for Henan Shanshui Geological Tourism Resources Development Co., Ltd, No. H15-115; The Key Research Project of Higher Education Institutions in Henan Province, No. 20A170010]

研究区位于河南省荥阳市万山地区,其孙家沟组出露良好、界线清楚、沉积较为连续,与下伏平顶山砂岩段、上覆刘家沟组均呈整合接触,下部主要以紫红色泥岩和细砂岩为主,中部主要为灰绿色、灰黄色泥岩,夹薄层钙质粉砂岩、灰岩或灰岩透镜体,上部为灰黄色厚层中细粒长石石英砂岩,夹包壳砾岩及暗紫红色泥岩(图1)。孙家沟组的年代归属问题有了较长时间的争论,在基于植物、动物区系和沉积层序等的相关性上,王仁农^[10]认为华北孙

家沟组是一个穿时的岩石地层单位,在海退较早的断块内部它属于晚二叠世晚期,在海退较晚的断块边缘,它(或它的中上部)属于早三叠世早期,并且为平顶山砂岩段的地质时代提供了较为详细的古生物资料,以大量的确切佐证说明其地质时代为晚二叠世晚期。张抗^[11]认为河南的孙家沟组是一个跨纪的岩石地层单元,它的上界具有穿时性,其中上部为早三叠世早期的沉积。也有学者根据渭北地区海相化石的证据认为整个孙家沟组应属于早三叠世^[12]。

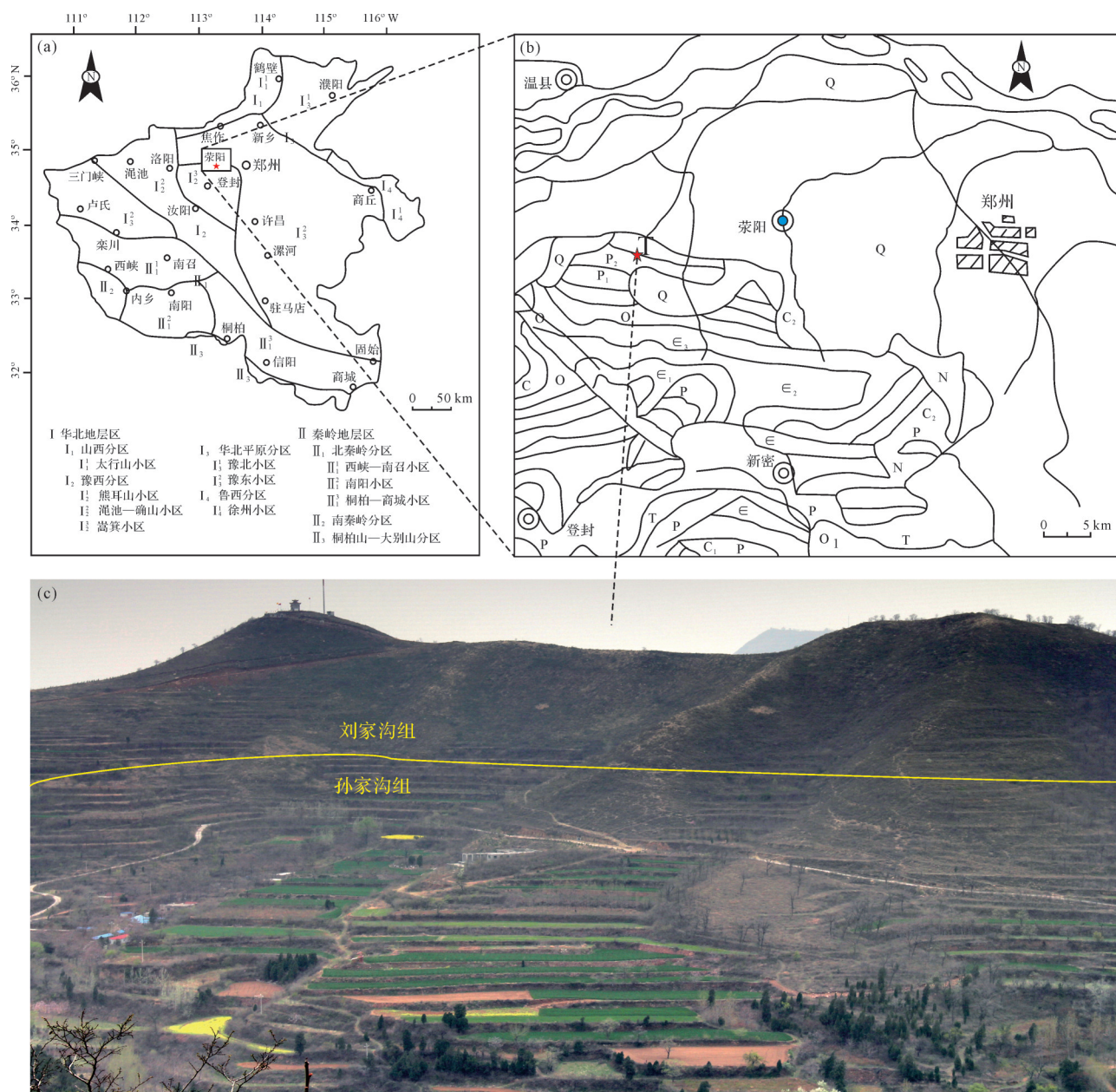


图1 河南古生代地层分区与荥阳地区区域地质图

(a) 河南省古生代地层分区图; (b) 荥阳地区区域地质图; (c) 研究区剖面图

Fig.1 (a) Paleozoic stratigraphic division of Henan province; (b) regional geological map in Xingyang area, western Henan province; (c) study area profile map

我们根据楚道亮等人研究发现的出现在豫西宜阳孙家沟组的典型的晚二叠世 *Ullmannia* 植物化石和在孙家沟组顶部下约 20 m 处的 *Lundbladispora* - *Aratrisporites* - *Taeniaesporites* 孢粉集合(该孢粉集合体被广泛的认为具有三叠纪早期植物特征)^[13], 认为孙家沟组时代是从晚二叠世晚期到早三叠世早期。

2 孙家沟组沉积环境分析

2.1 孙家沟组岩石学特征

孙家沟组总厚度约 235 m, 由下而上分为上下两部分, 共六段(图 2)。

孙家沟组下部可划分为 4 段。第一段(1~6 层)主要为厚层紫红色、暗紫红色泥岩, 球状风化强烈, 含有较多的钙质小球, 夹有浅灰色薄层粉砂岩和中层细粒石英砂岩, 砂岩节理发育, 层理不明显。第二段(7~11 层)出现 3 层中厚层浅灰色细粒长石石英砂岩夹两层暗紫红色泥岩沉积。第二段下部的砂岩中出现单向斜交错层理。孙家沟组下部第三段(12~15 层)以泥岩为主, 颜色上显示紫红色—灰绿色、灰黄色—浅红色—浅紫红色的变化, 该段的下部出现钙质粉砂岩以及钙质小球, 上部出现有薄层含砾砂岩和薄层灰岩及透镜体, 顶层砂岩表面发育有微生物成因沉积构造(Microbially Induced Sedimentary Structures, MISS)^[6]。第四段(16~20 层)为厚层中细粒长石石英砂岩, 该段下部为较厚的砂岩层, 上部为砂泥岩互层, 泥岩层较少且较薄, 砂泥岩比较大, 并且中间发育有包壳砾岩层。第 17 层下部砂岩中层理发育, 主要为板状和楔状交错层理, 节理发育。第 19 层砂岩中下部发育有水平层理, 向上有楔状交错层理和双向交错层理。在该段最上部紫红色泥岩中发现包卷层理。

孙家沟组上部, 第五段(21~29 层)岩石类型较多, 有砾岩、粗砂、细砂岩、泥岩和页岩。砂岩为灰色、浅褐红色、灰黄—灰绿色, 泥岩为灰绿色或紫红色, 出现 5 个旋回, 含有较薄的砾岩层, 厚约 0.5 m。砂岩中发育板状、楔状交错层理和平行层理, 粉砂岩中发育小板状交错层理。该段沉积中 22、23、24 层中发育 MISS。第六段(30~32 层)为厚层细粒长石石英砂岩, 其成分及结构成熟度较高。主要发育板状交错层理, 并且发育交错层理中夹有一砾岩层。下部厚层砂岩中也发育平行层理。孙家沟组晚期沉积中, 形成了由砾、砂、泥组成的沉积旋回, 共出现了 6 层沉积砾岩。

2.2 孙家沟组砂岩粒度特征分析

沉积物颗粒粒度主要受搬运介质、搬运方式、沉积环境等因素的控制, 粒度分布及分选性是衡量沉积介质能量的度量尺度^[14], 对沉积物颗粒粒度参数特征的研究可了解沉积物所处的沉积环境及水动力条件的变化。

在研究区孙家沟组中选取了 20 块砂岩样品进行粒度分析, 按照 ST/T 5434—2009《碎屑岩粒度分析方法》中 6.5 图像法步骤, 每个薄片统计 300 个粒径, 数据分析所用粒级标准采用伍登—温特华斯的粒级划分方案。

2.2.1 粒度参数特征

采用 Folk 和 Word 公式提出的 4 中参数, 即平均粒径(Mz)、标准偏差(σ_1)、偏度(Sk)、峰度(Kg)^[14]。经图解法计算得出相应的粒度参数, 结果见表 1。

由表 1、图 3 可知, 孙家沟组样品的平均粒径(ϕ 值)介于 1.78~4.13, 平均粒径平均值(ϕ 值)为 3.2。1 层(平顶山砂岩)样品平均粒径最大, ϕ 值为 1.78, 17 层样品的平均粒径最小, ϕ 值为 4.13。剖面下部样品平均粒径变化为由小到大, 粒度存在从粗到细的变化, 即早期孙家沟组沉积物接受河流的作用, 随着水体加深, 水动力条件呈逐步降低的趋势, 较细的沉积物逐渐沉积; 上部样品粒度缓慢变粗但增幅很小, 应该是平均水动力缓慢增强的结果。

研究区孙家沟组样品标准偏差 σ_1 范围在 0.43~0.94, 总体上是从分选极好逐渐变为分选中等。其中, 第 1 层到 17 层分选极好或好, 上部其他样品分选为较好, 但是分选程度在逐渐变差。碎屑物质的分选程度与沉积环境的水动力条件和自然地理条件有着密切的关系。下部分选极好或较好的沉积物应该是经历了河流长期的搬运、漂洗, 最终沉降, 或是水体加深时, 形成的河漫湖泊沉积; 上部分选较好的沉积物应是三角洲平原相的分流河道或三角洲前缘的水下分流河道的沉积物。标准偏差所代表的分选性的变化也可体现出水动力条件变化为先变弱再变强, 与沉积物的平均粒径变化规律基本一致。

偏度(Sk)和峰度(Kg): 研究区 20 个样品偏度值范围为 -0.17~0.25, 表现为由正偏态逐渐转变为负偏态再变为近似对称, 第 1 层样品至第 17 层样品为双峰, 上部其余样品为单峰; 峰度值为 0.84~1.5, 峰度多为中等, 少数尖锐。结合偏度和峰度特征分布规律, 推测出孙家沟组早期随着水体加深, 水动力减弱, 河

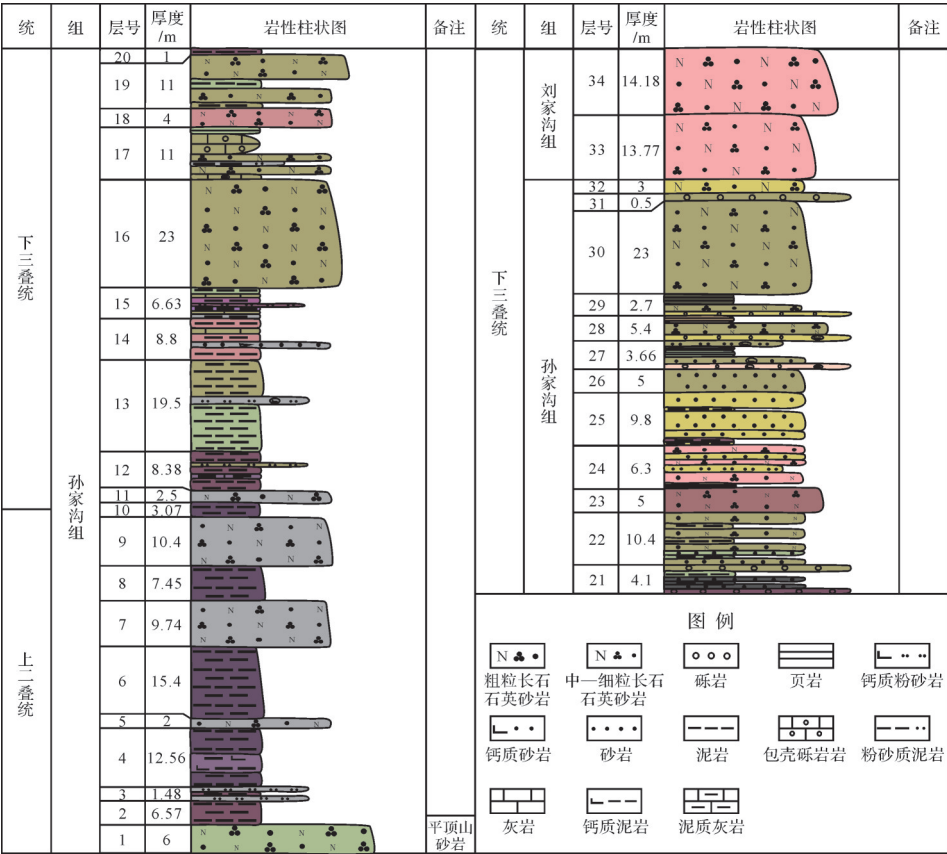


图2 万山地区孙家沟组岩性柱状图

Fig.2 Lithological column of the Sunjiagou Formation, Wanshan area

流沉积物出现以粗组分为主向以细组分为主的转变,直到后期出现分流河道和水下分流河道,形成三角洲相沉积。

2.2.2 概率累积曲线特征

根据碎屑沉积物搬运方式的不同,可划分出滚动、跳跃和悬浮三种粗细不同的粒度组分,在概率值累积曲线上产生不同的沉积响应,可反映出不同的沉积水动力条件,对沉积环境的解释具有一定的地质意义^[15-17]。本次研究选取5个样品对其概率累积曲线进行分析(图4)。

第3层、17层中和17层上样品的概率值累积曲线呈两段式,这种曲线由跳跃搬运总体和悬浮搬运总体组成,悬浮总体比较发育,第3层和第17层中悬浮总体含量可达40%,悬浮总体与跳跃总体之间的细截点在(2.75~3.00) ϕ 内,第22层样品悬浮总体含量达10%以上,悬浮总体与跳跃总体之间的细截点在3.50 ϕ 左右,可以看出水动力条件呈减弱的趋势。三条曲线跳跃总体含量较高,并分选较好,其斜率多在60°以上,不存在滚动组分,为典型的河流沉积的

粒度概率图,并识别出样品第3层和第17层属于河道沉积,第17层上部属于边滩沉积。22层样品的概率累积曲线表现为台阶状三段式,滚动总体占5%左右,以跳跃总体和悬浮总体为主,悬浮总体含量约占25%,悬浮与跳跃两总体间的叫切点 ϕ 值为3.2左右。其中滚动组分含量极少,该曲线与河流沉积相似,推测为三角洲相的分流河道微相。第34层样品为一跳一悬夹过渡式,是具有跳跃和悬浮总体间过渡段的两段式。跳跃总体含量占45%以上,斜率为60°左右,过渡段约为50%,斜率为40°,与跳跃总体间的交切点 ϕ 值为2,与悬浮总体间的交切点 ϕ 值为3.5,悬浮总体含量较22层变少,反映水流进入湖盆后能量降低的水动力特征,判断为三角洲前缘亚相的水下分流河道沉积。

2.3 孙家沟组沉积相分析

晚二叠世,华北地台周缘除秦岭洋外,均以闭合隆升,海水彻底退出华北地台区,沉积体系转变为内部盆地沉积^[18]。因而研究区在二叠纪末形成了以陆相为主的沉积环境。

表1 砂岩粒度参数
Table 1 Grain sizes of sandstone

层位	Mz/ϕ	σ_1	Sk	Kg/ϕ
1	1.78	0.78	0.07	0.93
3	2.87	0.43	0.23	1.23
5	2.43	0.55	0.05	1.23
9	2.88	0.46	0.01	1.02
11	3.57	0.47	-0.06	1.09
15	3.20	0.58	-0.14	1.50
16上	4.13	0.47	0.06	0.94
17下	4.07	0.67	-0.06	1.18
17中	2.95	0.57	0.13	0.84
17上	3.78	0.56	0.03	1.08
21下	3.35	0.53	-0.05	1.05
21中	3.57	0.90	-0.09	1.14
22	3.51	0.52	0.06	1.15
23	2.48	0.94	0.02	0.98
26中	3.78	0.68	0.03	0.92
26上	3.67	0.73	0.02	0.90
32	3.63	0.68	0.02	1.04
33	2.78	0.80	-0.15	0.92
34	2.18	0.86	0.25	0.85
34上	3.30	0.89	-0.17	1.33

注： Mz . 平均粒径； σ_1 . 标准偏差； Sk . 偏度； Kg . 峰度。

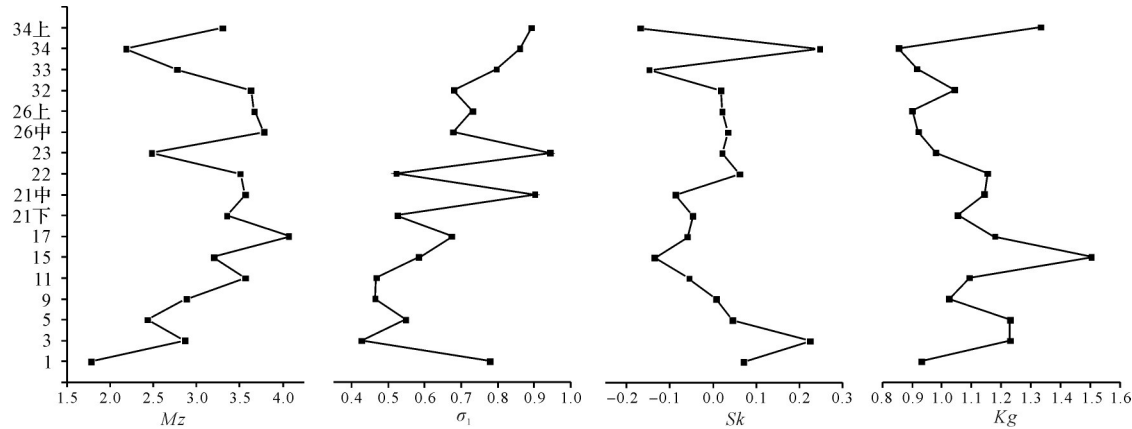


图3 砂岩粒度参数变化
Fig.3 Variation of sandstone grain size

2.3.1 孙家沟组下部沉积相分析

第一段(1~6层)沉积中第一层为灰绿色砂岩(图5a),向上主要以紫红色泥岩为主,夹有薄层粉砂岩和细砂岩(图5b),岩石颗粒较细,为典型的浅水发育特征。泥岩中发育滑塌构造(图5c)和水平层理(图5d),含有较多钙质结核(图5e)且风化较强烈,可推测气候较干旱。砂岩中有小板状交错层理发育,综合岩性特征、沉积构造特征,识别出一种沉积微相,为河漫亚相的河漫湖泊微相。

第二段(7~11层)厚层细粒长石石英砂岩与泥岩交替出现(图5f),构成沉积旋回,下部砂岩中发育典型的板状交错层理(图5g),顶部砂岩见平行层理和板状交错层理。根据综合岩性特征、沉积构造特征及相序的变化规律,该段出现粒度向上变细的韵律,识别为天然堤+河漫滩沉积。

第三段(12~15层)为泥岩夹薄层粉砂岩和5~6层的含砾砂岩(图6a),砾石较少且沿层面分布。下部紫红色泥岩中夹有钙质薄层和姜状钙质结核,钙

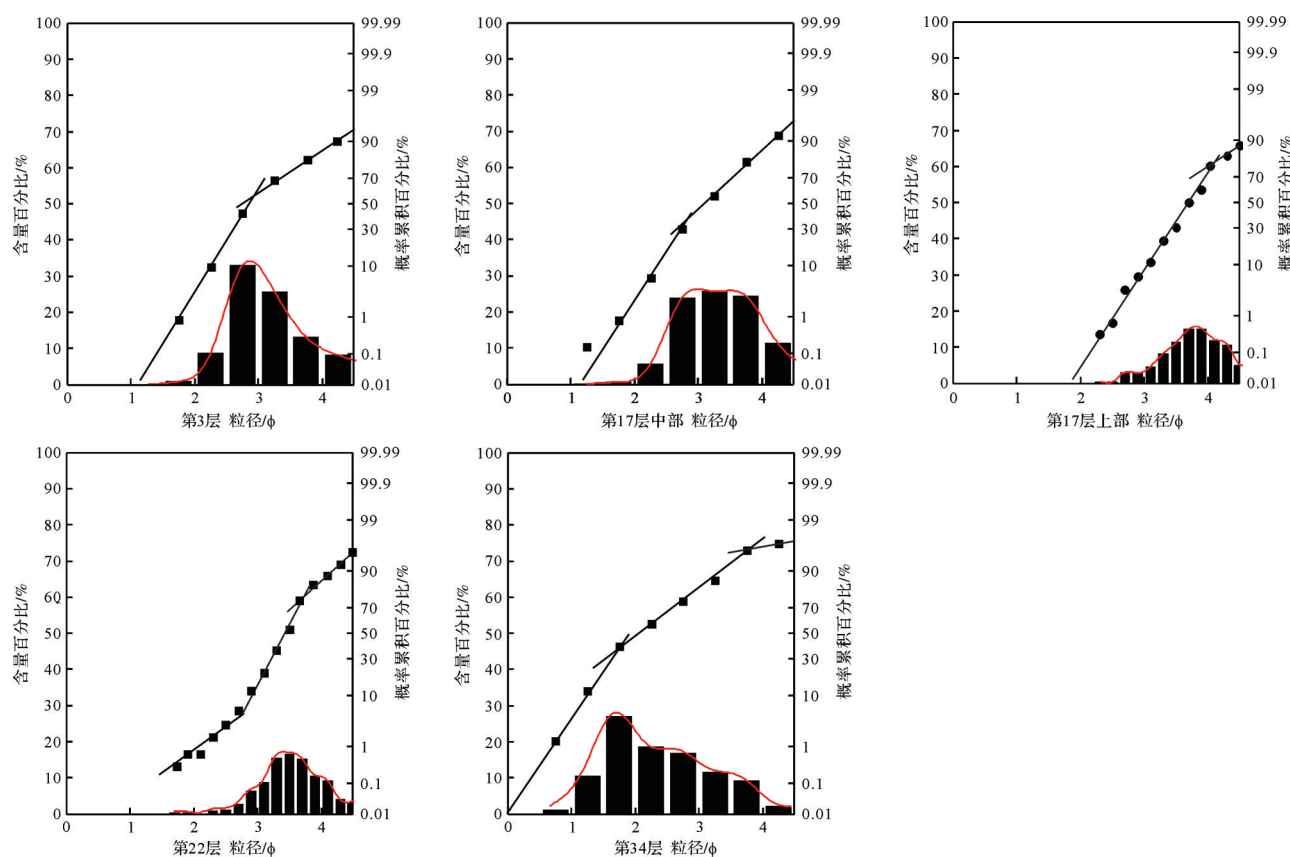


图4 万山地区孙家沟组概率值累计曲线

Fig.4 Probability accumulation curves for the Sunjiagou Formation in the Wanshan area

质层和钙质结核的出现是可能由于干旱气候下水面下降,表面急速蒸发形成的,在15层中出现较多的波痕(图6b)与MISS(图6c~e)共生的现象,MISS多形成于间歇性暴露的环境^[4]。紫红色泥岩可以指示水体较浅,因此下部紫红泥岩段为滨湖相。在灰绿色泥岩中也有水平层理和板状交错层理,并夹有灰岩透镜体,指示较深水环境,该段顶部的砂岩及粉砂岩中也发育较多的MISS,显示水体变浅。可推断该段整体经历了水浅—深—浅的局部变化。综合岩性特征、沉积构造特征及相序的变化规律,该段为河漫湖泊相。

第四段(16~20层)底部厚层砂岩上部发育楔状交错层理(图6f)和包壳砾岩层(图6g,h),包壳砾岩层中夹有较多的砾石,砾石磨圆度较好。包壳砾岩多形成在水流动力较强的环境下,在水流来回动荡翻滚形成。该段沉积为旋回性沉积,即“边滩+河漫滩沉积”。综合岩性特征、沉积构造特征和包壳砾岩的特点及相序的变化规律,该段沉积环境为边滩+河漫滩沉积。

孙家沟组下部沉积主要为一套较为典型的河流沉积,出现了“河漫+堤岸”和“河漫+堤岸+河床”两个旋回。局部水体位较浅时为河道沉积为主;水体变深,则形成河漫湖泊沉积(图7)。

2.3.2 孙家沟组上部沉积相分析

第五段(21~29层)沉积中有多个沉积旋回,砾岩和砂岩及泥岩共存(图8a)。该段底部发育似包卷层理(图8b)和椭圆状砂球(图8c),向上发育有水平层理(图8d),表明原来较弱的水动力突然急剧增强,后又迅速减弱,24层发现波状交错层理(图8e,f),且第21、22、24层中发育MISS,其中有MISS与泥裂共生。岩石粒度向上变细,为典型的河床亚相+天然堤亚相+河漫亚相重复出现,出现5个旋回。综合岩性特征、沉积构造特征及相序的变化规律,该段沉积环境为三角洲平原亚相。

第六段(30~32层)主要为厚层细砂岩,整合接触在下部三角洲平原沉积之上,其沉积物粒度较细,发育交错层理,其中夹有一砾岩层,综合岩性特征、沉

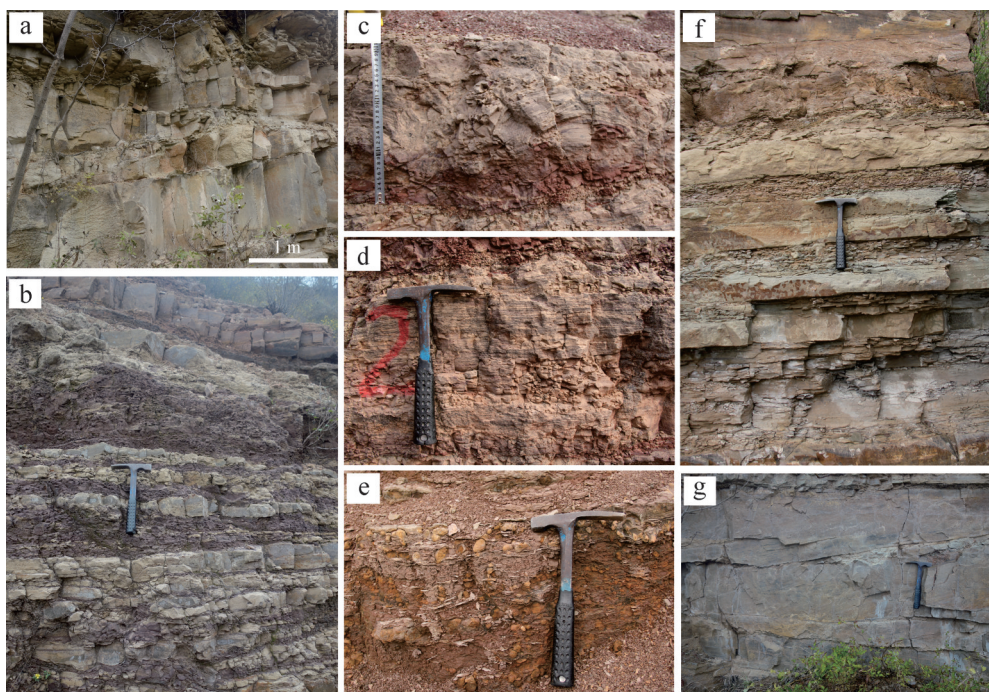


图5 万山地区孙家沟组1-2段沉积构造类型

(a)砂岩(第1层);(b)泥岩与粉砂岩互层(第2层);(c)滑塌构造(第2层);(d)水平层理(第3层);(e)钙质结核(第4层);(f)砂泥互层;(g)板状交错层理(第7层);(地质锤:30 cm)

Fig.5 Sedimentary structural types in the 1-2 member of the Sunjiagou Formation in the Wanshan area

(a) sandstone (1st layer); (b) interbedded mudstone and siltstone (2nd layer); (c) slump structure; (d) horizontal bedding (3rd layer); (e) calcareous concretions (4th layer); (f) sand-mud interbedding; (g) tabular cross-bedding (7th layer) (geological hammer length 30 cm)

积构造特征及相序的变化规律,该段为三角洲前缘沉积的水下分支河道微相。该段与上覆刘家沟组的浅红色厚层中细粒长石石英砂岩(33、34层)整合接触,同为三角洲前缘沉积。

孙家沟组上部沉积中,出现了序列较为明显的“河床滞留+边滩+河漫滩”的三角洲平原沉积,这时期形成了砾、砂、泥形成的沉积旋回,共出现了6层沉积砾岩,代表了水体逐渐变深,最后以三角洲前缘砂质沉积结束。该时期以水下分流河道的砂及粉砂沉积为主。所以孙家沟组上部是由早中期的河流相过渡为三角洲平原亚相和三角洲前缘亚相(图9)。

3 孙家沟组地球化学分析

本次研究在对研究区孙家沟组实测的基础上,根据野外分层情况自下而上尽可能的采集新鲜样品,选取其中36件新鲜岩样进行微量元素测试,微量元素测试工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,测试是在室温22℃,35%相对湿度的环境条件下,采用GB/T 14506.30—2010检测方法,使用X Serise 2等离子体质谱仪检测微量元素Li-U等

28种元素,泥质岩样品微量元素分析结果见表2。

3.1 古氧相分析

沉积物中存在一些对氧化还原敏感的微量元素,这些元素在沉积物中的含量和含量上的波动可以一定程度上指示沉积时的含氧情况及变化。本文采用Ni/Co、U/Th、V/Cr和V/(V+Ni)等4个微量元素比值(表3)作为氧化还原的指标来分析古沉积环境的含氧条件^[19-21]。

研究区采的36个样品中Ni/Co比值在1~5之间,均值为2.67。Jones *et al.*^[19]对挪威北海地区富有机质泥岩的古沉积水体含氧性的划分标准,Ni/Co大于7为贫氧—厌氧环境,介于7~5为贫氧环境,小于5为氧化环境。研究区样品Ni/Co比值均小于5,可以判断孙家沟整体为富氧环境。U、Th是地球化学性质比较相似的元素对。在还原条件下,U⁶⁺还原成U⁴⁺形成不溶化合物沉淀,使沉积中U/Th值增加,而在氧化条件下U/Th值则降低。因此,沉积剖面中U/Th值的系统变化可以反映环境的氧化还原特征。U/Th比值大于1.25为缺氧环境,介于0.75~1.25为贫氧环境,小于0.75为氧化环境^[22]。研究区U/Th值大约在0.1~0.3,

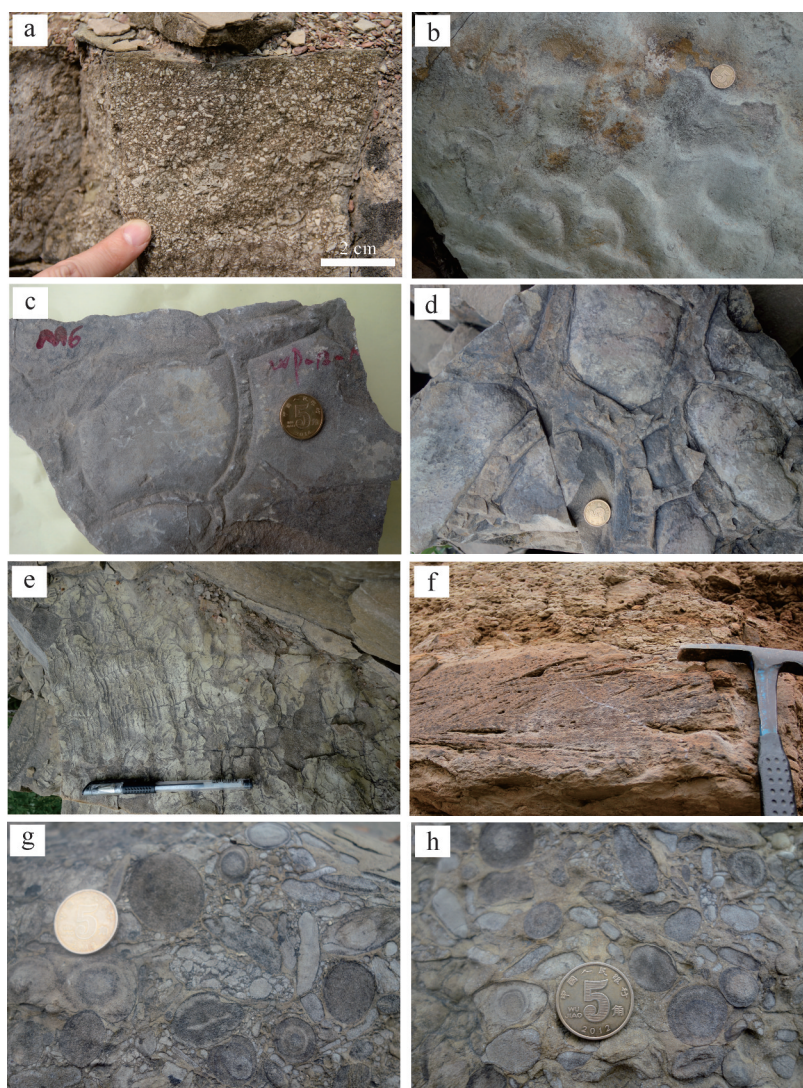


图6 万山地区孙家沟组3-4段沉积构造类型

(a)砾石(第14层);(b)单向流水波痕(第15层);(c,d)MISS(第15层);(e)波痕与MISS(皱饰构造)(第15层);(f)楔状交错层理(第16层);(g,h)包壳砾岩(第17层);(地质锤:30 cm;中性笔:15 cm;5角硬币:2 cm)

Fig.6 Sedimentary structural types in the 3-4 member of the Sunjiagou Formation in the Wanshan area

(a) rudite (14th layer); (b) unidirectional current ripple (15th layer); (c, d) MISS (15th layer); (e) ripple and MISS (15th layer); (f) wedge cross-bedding (16th layer); (g, h) coated conglomerates (17th layer); (geological hammer, 30 cm; pen, 15 cm; coin, 2 cm diameter)

均值为0.20。研究区的U/Th比值都远小于0.75,孙家沟组沉积期水体呈氧化环境,孙家沟组水体的氧化性较强。古氧相也经常使用V/Cr的比值来判断,V/Cr值大于2代表缺氧环境,V/Cr值小于2代表沉积环境的含氧量高,为氧化条件^[17]。该比值可能会受到粒度或碳酸盐的含量影响。研究区孙家沟组样品V/Cr值范围在0.9~2.2,均值为1.42;绝大多数样品的V/Cr值小于2,仅有下部一个样品为2.13,可能是因为粒度影响,推断该组水体含氧量相对较高。 $w(V)/w(V+Ni)$ 也可作为沉积古氧相判别条件的指标,当 $w(V)/w(V+Ni)>1.5$ 时指示地层水体富含 H_2S ,接近硫化水体; w

(V)/ $w(V+Ni)$ 比值介于1.0~1.5时指示一种水体分层不强的贫氧环境;当 $w(V)/w(V+Ni)<1.0$ 时表明水体为氧化环境^[23]。研究区 $w(V)/w(V+Ni)$ 值分布在0.6~0.82,均值为0.72,基本上为水体分层不强的富氧环境。

研究区孙家沟组36个样品中Ni/Co、U/Th、V/Cr和V/(V+Ni)等4种微量元素的比值(图10)分析表明孙家沟组沉积期水体整体上呈氧化环境,且氧化性较强。

3.2 古盐度分析

古盐度在恢复古气候特征方面具有重要意义。

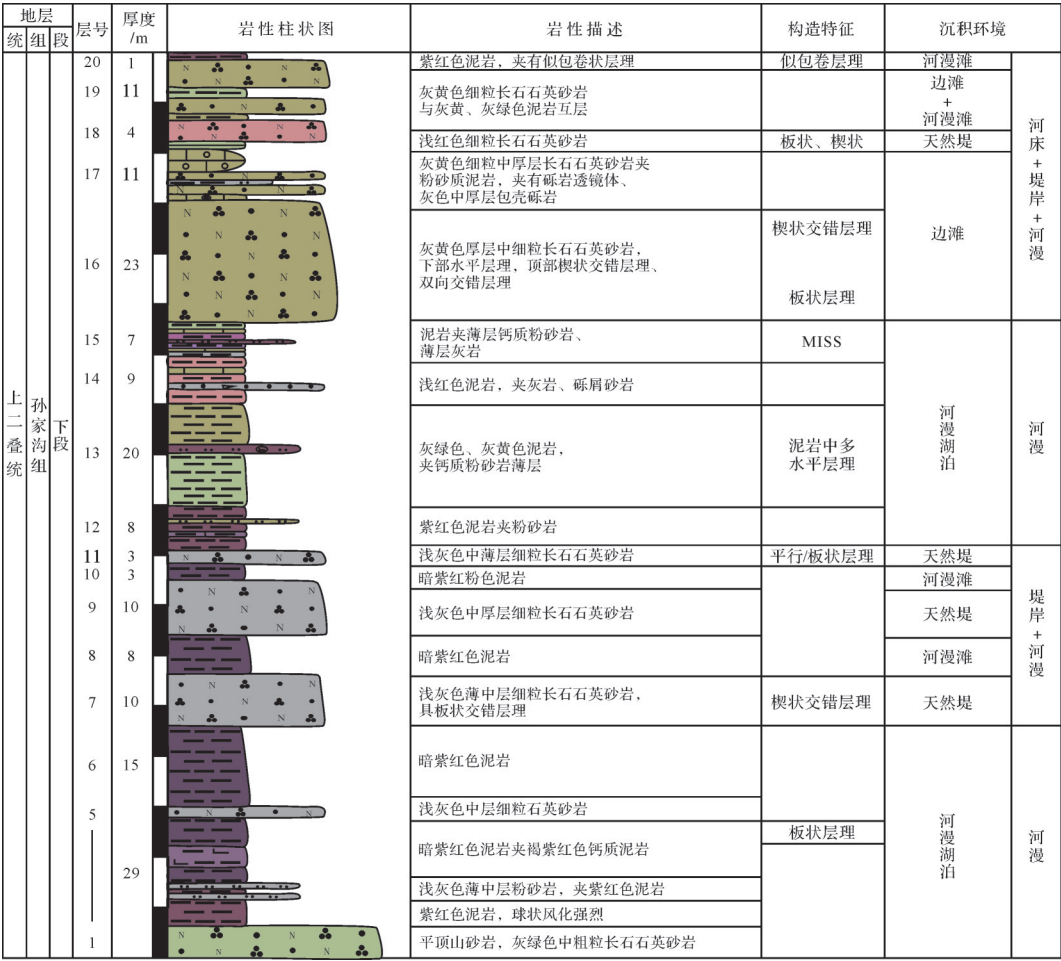


图7 孙家沟组下段沉积特征

Fig.7 Sedimentary characteristics of the lower member of the Sunjiagou Formation

Sr/Ba值分析古盐度属于比较常用的恢复古盐度的方法^[24]。根据统计分析认为Sr/Ba大于1为咸水,0.6~1为半咸水,小于0.6为陆相环境(表4)^[25]。孙家沟组样品的Sr/Ba值分布在0.10~0.48,均值为0.17,远小于0.6,可认为孙家沟组沉积期为淡水环境。Th/U也是判定古盐度的方法之一,Th容易被黏土矿物吸附,而U则容易淋失或者氧化,所以海相沉积物中Th/U比值小于2,而陆相沉积环境中的沉积物Th/U比值相对高(表4)^[26]。研究区孙家沟组样品Th/U比值范围在3.41~7.98,均值为5.27,皆大于2,判断为陆相环境。

根据Sr/Ba和Th/U两个古盐度地球化学指标分析,孙家沟组沉积期为陆相淡水环境。

3.3 古气候分析

沉积区的古气候条件直接影响各种地质作用,古气候是沉积相和古地理分析的重要条件。本文采用Sr/Cu值作为古气候的识别指标。干旱气候条件

下,水体介质会趋于碱性,Sr、Cu等元素从水体中析出,富集于岩石中。Sr/Cu比值介于1~10指示温暖湿润气候,而大于10指示干热气候^[27]。研究区Sr/Cu值出现5次大于10的层位,分别在第3层,5层,13层,17层,21层,并且第30层Sr/Cu值为9.56,其他层位变化范围不大,在0~7,平均值为3.87,在1层到13层Sr/Cu值不超过3.5,从13层到32层Sr/Cu值呈现升高—降低—再升高的趋势,且在孙家沟组中部的降低没有恢复到最初的程度。根据古盐度的分析,孙家沟组为陆相淡水沉积,古盐度与古气候密切相关^[24],从图10可以看出,Sr/Ba与Sr/Cu呈正相关关系,二者相关性较高,即在温暖湿润的气候条件下,古盐度值比较低。根据对Sr/Cu比值和Sr/Ba与Sr/Cu的相关性分析可以得出研究区孙家沟组沉积时期整体为温暖湿润气候,早期出现过几次炎热干旱气候,在第2次干旱气候出现以后,古气候的温湿程度出现了降低—升高—再降低的变化。

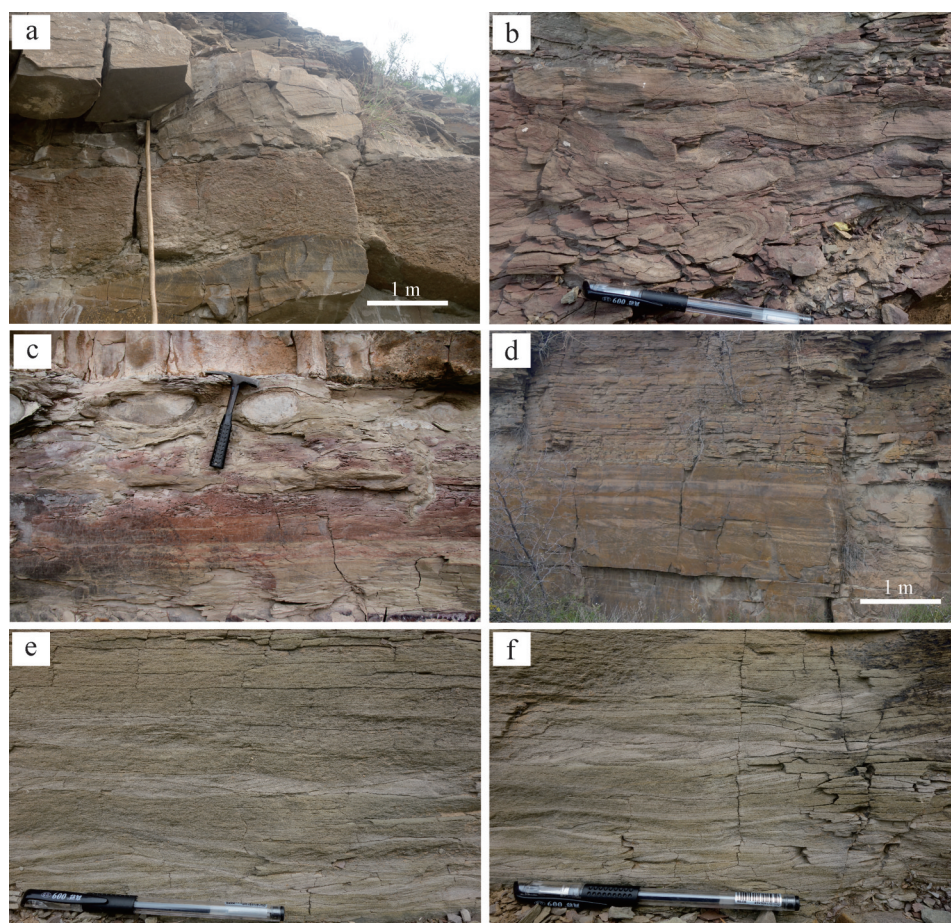


图8 万山地区孙家沟组5-6段沉积构造类型

(a)砂岩夹砾岩;(b)似包卷层理(第21层中部);(c)椭圆状砂球(第21层中部);(d)水平层理(第21层上部);(e,f)波状交错层理(第24层)
(地质锤:30 cm;中性笔:15 cm)

Fig.8 Sedimentary structural type of 5-6 member, Sunjiagou Formation in Wanshan area

(a) sandstone with conglomerate; (b) quasi-convolute bedding (mid-21st layer); (c) elliptical sand ball (mid-21st layer);
(d) parallel bedding (upper 21st layer); (e,f) wavy cross-bedding (24th layer); (geological hammer, 30 cm; pen, 15 cm)

3.4 物理化学风化强度分析

Rb/Sr 比的变化可以作为反映流域物理化学风化强度的指标,随着风化程度的增强,风化残留中 Rb/Sr 值明显增加,并且 Rb/Sr 比值大小与风化程度之间呈正相关关系^[28]。从图 10 可以看出,研究区总体上风化作用强烈。前中后期各有较大的峰值,后期有所减弱。

风化作用可以导致 U 的氧化淋失,Th/U 值随着风化作用的增强而增加^[29],当其值>4 时与风化作用有关^[30]。研究区内 Th/U 值为 3.41~7.98,平均为 5.27,在图 10 中可以看出,绝大部分高于上地壳 Th/U 值 (3.8)^[31],大气淡水淋滤等风化作用对孙家沟组的破坏程度较大,孙家沟组基本上均遭受到中等强度风化作用。

4 讨论

4.1 荥阳地区孙家沟组的沉积环境变化

二叠纪末期,华北地台南缘整体抬升,海水逐步退出,地台内盆地进入陆相沉积环境发展阶段。晚二叠世晚期,华北地块南缘全区演化为河流—湖泊体系沉积,此时的湖盆发育在郑州以东地区,主要是浅湖—较深湖相沉积,以巨厚暗紫红色细粒砂岩和泥岩为主。华北地块南部晚古生代至三叠纪沉积盆地的形成演化与其南侧秦岭造山带的造山作用密切相关,尤其是北秦岭—北淮阳构造带的发展演化过程具有直接控制作用。并且北秦岭—北淮阳构造带造山隆升具有阶段性,早二叠世早期和晚二叠世晚期造山带隆升速度较快,而早二叠世晚期至晚二叠世早期山带相对较慢^[9]。构造造山运动控制了研究

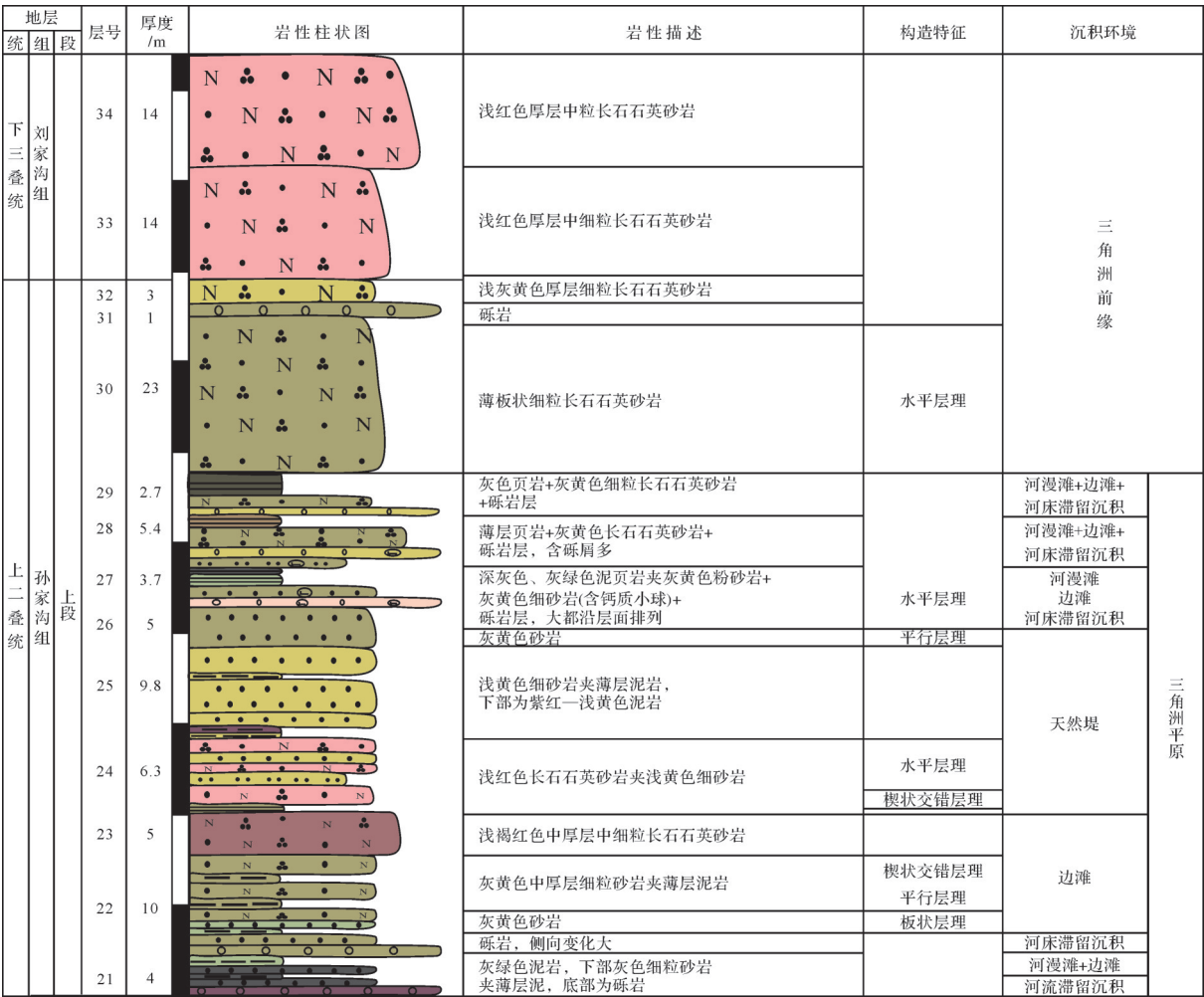


图9 孙家沟组上段沉积特征
Fig.9 Sedimentary characteristics of the upper section of the Sunjiagou Formation

区的沉积环境,晚二叠世孙家沟组沉积期华北区海水退出,南部隆起,转变为内陆湖盆的时期。荥阳地区在未完全摆脱海水影响的古地理背景下,形成以陆相为主的沉积环境。因此,研究区沉积环境由晚二叠世河流—三角洲平原沉积过渡到早三叠世的三角洲前缘沉积,其构造控制是中、晚二叠世北秦岭—北淮阳构造带隆起造成的,后由于东部地区抬升造成湖水加深形成以三角洲前缘相至湖泊相的沉积环境。

荥阳万山地区孙家沟组下段主要为紫红色、灰黄色泥岩和浅灰色、灰黄色细粒长石石英砂岩。在第一段和第三段的砂岩中发育有许多板状和楔状交错层理,第15层砂岩中发育较多的波痕与MISS共生的现象,波痕常出现在湖泊环境中,MISS多形成与间歇性暴露的环境。孙家沟组下段的泥岩应是河漫湖泊环境沉积,有紫红色泥岩中夹有钙质薄层或钙质

结核,加上MISS的发育,可以指示由于干旱气候导致水面下降的浅水沉积。与紫红色泥岩比较,灰黄色泥岩应该是在气候相对湿润、水体较深的环境中沉积的。第二段和第四段出现的砂泥互层,构成“天然堤+河漫滩、边滩+河漫滩”的沉积旋回,体现河流的“二元结构”。砂岩中发育有板状和楔状交错层理,并且出现有包壳砾岩和磨圆较好的砾石,都表现出较强的水动力条件。

孙家沟组砂岩样品粒度分析表明,下段砂岩的平均粒径存在从粗变细的趋势,并且根据偏度和峰度也表示由以粗组分为主向以细组分为主的转变,可以得出孙家沟组下部沉积从下往上,水动力条件在逐渐降低。根据第3层和第17层的概率累积曲线判断该层沉积为河流相沉积。因此推断孙家沟组早期为河流相沉积,水体出现“深—浅—深—浅”的变化。

表2 万山地区孙家沟组泥岩微量元素测试结果($\mu\text{g/g}$)
Table 2 Trace element data of Sunjiagou Formation in Wanshan area ($\mu\text{g/g}$)

样品编号	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Nb	Mo	Cd	Sb	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
WP-60-01	7.19	0.15	83.1	1.51	585	15.6	8.68	42.8	1.14	3.43	5.34	8.02	2.02	13.9	14.9	2.11	0	0	0.24	0.74	57	0.13	0.34	0.15	6.45	0	2.73	0.64
WP-59 E-02	7.25	0.27	91.3	1.44	410	14.3	8.29	40.5	1.75	4.63	8.17	13.5	2.2	13.7	20.2	1.42	0	0	0.24	0.75	118	0.11	0.23	0.15	7.17	0	3.18	0.57
WP-59 F-01	11.7	0.87	388	4.33	1490	26.6	19.3	377	4.25	13.3	10.9	23.7	7.06	58.9	17.5	5.87	0.14	0.35	0.69	2.43	463	0.58	1.07	0.39	13.2	0.16	9.55	1.34
WP-58-02	14.1	1.21	565	6.27	2194	42.8	33.4	204	7.36	16.9	12.7	43.3	10.2	81.4	28.1	8.27	0.16	0.31	0.35	3.54	218	0.72	0.96	0.51	8.52	0.15	11.7	1.83
WP-58-01	19.7	1.26	622	6.6	2159	44.9	38.8	343	5.23	16	12.8	42.9	10.1	65.7	57.8	8.3	0.12	0.31	0.42	2.71	228	0.72	0.92	0.43	12.1	0.18	12.1	1.95
WP-56-01	22.1	1.48	679	6.94	2159	49.9	41.2	370	6.09	26	13.9	59.7	12.1	78.7	133	8.65	0.15	0.33	0.35	3.54	1188	0.76	1.08	0.47	20	0.19	15.3	2.13
WP-53-01	21.2	1.65	607	7.28	2215	46.3	42.2	306	7.52	19.5	13.6	52.3	12.8	95	89.9	8.82	0.11	0.18	0.51	4.17	1096	0.7	1.01	0.55	12	0.16	9.56	1.88
WP-52-01	21	1.21	721	6.47	2661	46	39.7	322	5.53	16.7	13.9	44.2	9.81	63.7	93.1	10.1	0.15	0.24	0.45	2.97	459	0.76	1.05	0.41	21.9	0.21	18.3	2.41
WP-50-01	20.4	1.46	603	6.52	2269	45	38.7	373	5.57	16.4	14.6	42.6	10.6	75.8	99.6	9.43	0.13	0.27	0.36	3.76	208	0.92	1.01	0.46	13	0.17	14.9	2.23
WP-48-01	24.6	2.22	511	8.7	2626	56.5	43.6	202	8.25	24.5	19.9	62.9	16.2	118	62.7	10.4	0.11	0.13	0.49	6.1	291	0.76	1.07	0.72	11.1	0.22	7.88	1.83
WP-45-01	20.3	1.45	591	6.61	2309	46	36.7	270	6.48	16	12.1	43	10.6	74.9	77.8	8.58	0.12	0.17	0.34	3.44	779	0.6	0.89	0.45	57.1	0.16	10.6	2.05
WP-44-02	25	1.8	574	8.06	2087	54.1	44.5	209	7.3	23.9	16.2	57.3	13.2	89	58.7	7.8	0.1	0.15	0.51	3.88	225	0.58	0.9	0.54	11.9	0.18	8.79	1.54
WP-34-02	13.4	0.94	327	3.85	1340	33.3	19.2	50.9	3.63	11.1	9.11	22.4	6.51	62.7	22.2	4.73	0	0	0.41	2.35	129	0.36	0.6	0.42	10.1	0.15	6.17	1.27
WP-33-01	24.4	1.9	438	7.19	2035	49.9	38.7	226	9.4	20.4	11.9	54.2	13.3	115	72.8	8.58	0.14	0.1	0.58	5.43	686	0.68	0.93	0.68	13.5	0.1	7.77	1.6
WP-30-02	31.1	3.03	523	13.7	3368	98.2	70.2	114	15	36.4	16.7	74.6	22.6	193	47.2	13.3	0	0	0.89	11.4	420	0.96	1.63	1.15	14.1	0.27	10.9	2.64
WP-29-01	13.1	0.49	212	2.66	790	18.3	13.1	555	1.93	6.27	4.44	23.9	4.03	37.5	99	3.86	0	0.36	0.4	1.56	216	0.45	0.41	0.31	27.3	0.14	3.46	0.73
WP-27-01	32.6	3.28	486	13.4	3357	102	61.7	166	13.4	31.4	28.9	80.3	22.9	192	63.8	14.1	0.18	0	1.95	13.8	441	1.11	2.06	1.13	23.9	0.43	13	2.94
WP-25-01	32.9	2.97	541	13.6	3324	96.3	67.1	222	14.9	34.6	28.7	86.3	23.1	200	71.4	13.9	0.22	0	1.98	13.8	410	1.22	2.09	1.12	25.1	0.42	12.7	2.68
WP-22-01	16.3	0.37	146	1.74	552	13	10.8	92.5	1.46	5.74	4.57	12.1	3.09	26.1	11.8	2.46	0	0.14	0.28	1.46	214	0.14	0.29	0.22	5.29	0.1	3.49	0.46
WP-21-01	33.7	2.44	695	10.6	3216	75.4	54.5	191	9.44	27.2	20.2	78	19.1	145	78.5	13.2	0.14	0.23	0.83	7.09	400	1.14	1.53	0.85	19.1	0.31	11.4	2.53
WP-21 E-03	15.8	0.98	261	3.45	785	27.3	19.2	448	4.49	13.3	3.81	29.1	5.81	42.8	92	3.21	0	0.29	0.31	2.11	319	0.29	0.38	0.32	24.5	0	6.51	0.82
WP-20-03	11.2	0.92	469	4.25	1424	29.3	30.6	476	3.83	10.5	8.05	24	6.49	50.8	109	5.62	0	0.61	0.36	2.45	291	0.4	0.62	0.35	10.8	0.15	7.68	1.71
WP-19 E-01	30.1	1.45	592	7.4	2271	51.9	33.7	226	7.05	16.7	15.8	54.6	12.9	91.9	87.6	9.09	0	0.14	0.47	4.23	685	0.7	1.09	0.55	12.4	0.28	12.8	2.3
WP-18-01	33.2	2.39	509	12.5	3247	95.9	65.4	188	9.59	25.2	19.2	61.2	21.7	164	86.1	12.4	0	0.1	0.58	10.3	308	0.94	1.6	0.92	8.73	0.26	12.1	2.82
WP-15-01	47.8	2.8	496	14.1	3164	96.4	67.9	477	17.6	34	36	82.7	21.6	154	111	12.2	0.28	0.24	0.91	9.64	326	0.86	2	0.88	26.8	0.43	12.6	2.58
WP-14-04	56.6	3.01	535	13.3	3299	108	54.8	447	12.5	31.2	15.1	76.2	22.9	135	81.7	13.3	0.33	0.4	1.3	10.2	341	1.12	2.15	0.87	25.5	0.54	12.6	3.7
WP-14-02	77.9	2.55	584	15.3	3770	114	85.5	460	18.6	35.9	28	86.6	24.3	131	124	15.1	0.15	0.12	0.7	9.82	639	1.32	1.81	0.84	13.4	0.38	13.4	3.3
WP-13-06	53.7	0.38	294	5.16	1038	36.2	25.9	4245	22.6	25.2	8.43	93.1	8.88	16.7	284	4.67	0.15	0.38	0.18	1.54	6325	0.5	0.59	0.2	14.6	0.14	4.85	1.21
WP-13-01	77.1	2.84	549	15.4	3278	113	72.6	247	17.8	43.9	38.4	82.4	21.4	112	62.7	11.4	0.31	0	0.54	8.18	531	0.92	1.61	0.67	12.1	0.37	12.1	3.34
WP-12-01	38.2	0.96	262	6.51	1581	46.2	38.8	264	7.58	21.3	16.8	35.5	7.75	42.3	37.5	5.44	0	0.11	0.26	2.65	211	0.43	0.75	0.29	10.6	0.16	7.07	1.57
WP-11 E-02	51.5	2.99	711	13.9	2869	106	81.1	150	14.7	43.3	13.2	60.4	19.2	151	44	9.93	0.25	0	1.51	11.3	1031	0.71	1.56	0.85	47.3	0.46	12.2	2.81
WP-10-01	31.5	0.79	116	6.47	1681	51	32	110	9.71	20.8	19.6	36.1	8.53	47.7	18.5	5.89	0	0	0.39	2.92	184	0.44	0.77	0.38	7.74	0	6.81	1.18
WP-06-01	20.5	0.41	52.8	2.53	833	23.9	11.2	1440	5.51	10.6	61.2	14.5	3.99	24.7	13.9	3.12	0.44	0	0.25	1.53	997	0.2	0.41	0.25	5.44	0	3.61	0.65
WP-04-02	67.7	2.94	409	17.1	3229	121	97	504	18.7	50.4	6.45	76.5	22.2	188	64.8	11.2	0.24	0.13	1.31	13	1181	0.77	1.65	1.04	31.3	0.38	14.5	4.15
WP-02-05	26.5	1.52	304	8.91	1981	60.3	46	1686	10.2	26.5	21.4	41.3	12.4	111	35.6	7.36	0.22	0.26	0.57	7.01	292	0.51	1.05	0.66	11	0.19	9.27	2.04
WP-00-01	12.4	0.84	187	2.08	743	13.1	6.77	334	1.82	4.3	2.27	26.1	7.5	33.4	45.7	3.67	0.12	0	0.45	1.68	1030	0.3	0.41	0.27	18.2	0	9.21	1.15

表3 古氧相微量元素地球化学指标^[19]
Table 3 Oxygen in trace element
geochemical indicators^[19]

环境	Ni/Co	U/Th	V/Cr	V/(V+Ni)
缺氧	>7.0	>1.25	>4.25	>1.5
贫氧	5.0~7.0	0.75~1.25	2.0~4.25	1.0~1.5
氧化	<5.0	<0.75	<2.0	<1.0

第五段中砾岩、砂岩和泥岩共存,出现5个沉积旋回,21层、22层、24层发育有 MISS 和泥裂,砂岩中出现有板状、楔状交错层理和平行层理,细砂岩中也有小板状交错层理发育。根据粒度分析得出较上段粒度变粗、分选变差。第五段沉积特征与河流体系

的河床沉积类似,判断为三角洲平原亚相。第六段主要为厚层细粒长石石英砂岩,主要发育有板状交错层理。该段整合接触在三角洲平原河漫滩沉积之上,并且夹有一层砾岩,判断为三角洲前缘的水下分支河道微相。

表4 古盐度微量元素地球化学指标^[21]
Table 4 Paleosalinity in trace element
geochemical indicators^[21]

环境	Sr/Ba	Th/U
咸水	>1	<2
半咸水	1~0.6	
淡水	<0.6	>2

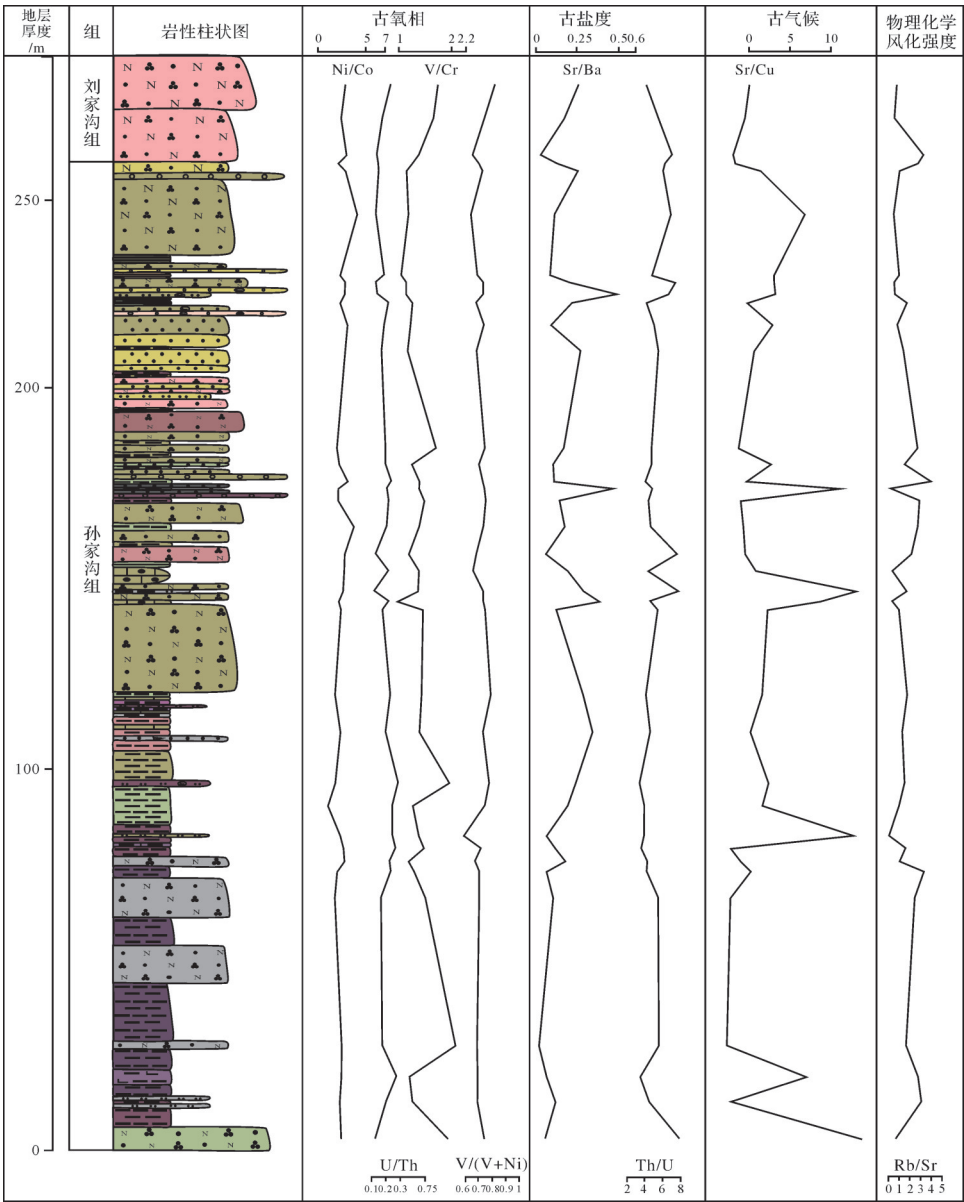


图10 万山地区孙家沟组微量元素地球化学分析

Fig.10 Analysis of trace element geochemistry of the Sunjiagou Formation in the Wanshan area

荥阳万山地区孙家沟组整体上受华北地台南隆影响,形成河流沉积,水进形成湖相的三角洲平原沉积和三角洲前缘沉积,应该是华北地块南缘河流相向湖泊相演化阶段,万山地区正处于河流进入湖盆形成三角洲的位置。

4.2 荥阳地区孙家沟组古气候和古环境特征

二叠纪末期陆地风化作用先减弱然后快速增强,且该时期陆地风化强度始终处于较高水平,陆表气候较温暖并在一段时期内保持稳定^[1]。华北地区的孙家沟组记录了古气候由温湿气候向干热气候的转换^[32]。孙家沟组的红色沉积和钙质结核都是干旱气候的产物,例如豫西宜阳地区孙家沟组整体为陆相淡水环境沉积环境,上段大量钙质结核的出现预示古气候由温暖潮湿向炎热干旱环境的转变,水体古氧相为氧化环境^[33]。但是局部地区也会出现差异,例如济源盆地孙家沟组前期和后期均为强烈风化作用的长时间暴露的三角洲平原相,并且炎热多雨,中期则水平面上升,水下三角洲前缘以砂质沉积为主^[28]。

根据 Ni/Co、U/Th、V/Cr 和 V/(V+Ni) 等 4 个古氧相判定指标来看,万山孙家沟组的样品均是在富氧的水体环境中沉积的。样品中的 Sr/Ba 值在 0.10~0.48,处于淡水环境的范围内(小于 0.6),Th/U 值在 3.41~7.98,也是在陆相淡水环境沉积的(大于 2),并且 Th/U 值随着风化作用的增强而增加,绝大部分高于上地壳 Th/U 值(3.8),推断可能是因为大气淡水的作用对孙家沟组的破坏程度较大,孙家沟组受到了较强的风化作用。根据 Sr/Ba 和 Sr/Cu 比值曲线得出孙家沟组沉积时期整体为温暖湿润气候,之间出现过几次炎热干旱气候,主要分布在下段,分别位于第 3 层,5 层,13 层,17 层,21 层。在第 5 层和 13 层中都出现有钙质薄层和钙质结核,17 层出现有 MISS 和灰岩,21 层出现 MISS 和泥裂共生,风化较严重的砾岩。根据对微量元素 Sr/Ba 和 Sr/Cu 比值的数据分析和钙质结核的出现都指示在孙家沟组沉积期是在温湿气候的背景下,前期有炎热干旱与温湿气候交替出现的现象。

研究区的孙家沟组中红色沉积主要出现在下段,并且伴随有钙质薄层和钙质结核的出现,上段开始以灰黄灰绿色沉积为主,这就说明了在荥阳的孙家沟组沉积晚期的气候与华北其他地区发育的大套红层有所不同。研究区该时期地层中元素微量元素发生了明显的变化,特别是从 10 层开始到 15 层之

间,古环境和古气候等几个地化指标发生的变化较为明显,古气候呈炎热干旱,且有风化强度加强的趋势。整体上荥阳孙家沟组的古气候主要为前期湿润与炎热干旱气候交替出现,后期转变为温暖潮湿的气候,并且在 15 层处出现 MISS 以及多层砾岩,说明此时生态系统受到破坏,水土流失严重,微生物群落开始大量发育。

5 结论

(1) 研究区孙家沟组早期水动力条件较强,主要以“河漫+堤岸+河床”两旋回形成的河流相沉积为主,随着水动力的降低,后期逐渐过渡为三角洲平原和三角洲前缘沉积,水体逐渐加深。

(2) 研究区孙家沟组为陆相淡水的沉积环境,基本上没有受到海的影响,整体为氧化环境。整个孙家沟组沉积期主要为温暖湿润的气候,物理化学风化强度较大,之间出现过几次干旱的气候,主要集中在孙家沟组沉积期前期,干旱气候导致水面下降,变为间歇性暴露的浅水沉积。

致谢 感谢审稿专家与编辑老师提出的宝贵意见,在此表示诚挚谢意!

参考文献 (Reference)

- [1] 曹莹. 化学风化指标对华北二叠纪—三叠纪陆地风化及气候变化的指示意义[D]. 武汉:中国地质大学,2018. [Cao Ying. Permian-Triassic continental weathering and climates reconstructed in North China from chemical weathering indices [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.]
- [2] Bottjer D J, Clapham M E, Fraiser M L, et al. Understanding mechanisms for the End-Permian mass extinction and the protracted Early Triassic aftermath and recovery[J]. GSA Today, 2008, 18(9): 4-10.
- [3] 童金南,殷鸿福. 早三叠世生物与环境研究进展[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 497-508. [Tong Jinnan, Yin Hongfu. Advance in the study of Early Triassic life and environment[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2009, 48(3): 497-508.]
- [4] 戎嘉余,黄冰. 生物大灭绝研究三十年[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(3): 377-404. [Rong Jiayu, Huang Bing. Study of Mass Extinction over the past thirty years: A synopsis[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, 44(3): 377-404.]
- [5] 郑伟,齐永安,邢智峰,等. 豫西济源二叠纪末—三叠纪初陆相微生物成因构造及其古环境意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1121-1132. [Zheng Wei, Qi Yong'an, Xing Zhifeng, et al. Characteristics and paleoenvironmental significance of microbially Induced Sedimentary Structures (MISSs) in terrestrial P-T boundary

- in Jiyuan, western Henan province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1121-1132.]
- [6] 邢智峰,周虎,林佳,等. 河南宜阳下三叠统刘家沟组微生物成因沉积构造演化及其对古环境变化的响应[J]. *古地理学报*, 2018, 20(2): 191-206. [Xing Zhifeng, Zhou Hu, Lin Jia, et al. Evolution of microbially induced sedimentary structures and their response to palaeoenvironment variation of the Lower Triassic Liujiagou Formation in Yiyang area, Henan province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(2): 191-206.]
- [7] 欧阳舒,王仁农. 豫皖地区平顶山砂岩段地质时代的探讨[J]. *石油实验地质*, 1985, 7(2): 141-147. [Ouyang Shu, Wang Rennong. Age assignment of the Pingdingshan member in Henan and Anhui provinces [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1985, 7(2): 141-147.]
- [8] 于水情. 河南宜阳下三叠统刘家沟组微生物成因沉积构造的古环境特征[D]. 焦作:河南理工大学, 2014. [Yu Shuiqing. Palaeoenvironment feature for microbially induced sedimentary structures from the Lower Triassic Liujiagou Formation on Yiyang county of Henan province [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.]
- [9] 陈世悦. 华北地块南部晚古生代至三叠纪沉积构造演化[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(5): 536-540. [Chen Shiyue. Sedimentary-Tectonic evolution from Late Palaeozoic to Triassic in the south of North China Block[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(5): 536-540.]
- [10] 王仁农. 豫西石千峰组研究新进展[J]. *地质论评*, 1997, 43(2): 200-209. [Wang Rennong. New advance of the study of the Shiqianfeng Formation in western Henan[J]. *Geological Review*, 1997, 43(2): 200-209.]
- [11] 张抗. 孙家沟组穿时性讨论[J]. *中国区域地质*, 1991(3): 221-228. [Zhang Kang. Diachronism of the Sunjiagou Formationa discussion[J]. *Regional Geology of China*, 1991(3): 221-228.]
- [12] 杨遵仪,殷鸿福,林和茂. 陕西渭北石千峰群的海相化石[J]. *古生物学报*, 1979(5): 53-62, 107-108. [Yang Zunyi, Yin Hongfu, Lin Hema. Marine Triassic faunas from Shihchienfeng Group in the northern Weihe River Basin, Shaanxi province[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1979(5): 53-62, 107-108.]
- [13] Chu D L, Tong J N, Song H J, et al. Early Triassic wrinkle structures on land: Stressed environments and oases for life[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10109.
- [14] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京:石油工业出版社, 2008. [Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology*[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.]
- [15] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- [16] 杨玉卿,田洪,孟杰,等. 渤海湾中部南堡35-2地区新第三系河流沉积及油气勘探意义[J]. *古地理学报*, 2001, 3(4): 77-84. [Yang Yuqing, Tian Hong, Meng Jie, et al. Fluvial sediments and their oil-gas exploration significance of the Neogene in the Nanpu 35-2 area of central Bohai Gulf[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(4): 77-84.]
- [17] 李亚龙,于兴河,单新,等. 鄂尔多斯盆地东南部下石盒子组盒8段物源特征与沉积相[J]. *东北石油大学学报*, 2016, 40(3): 51-60. [Li Yalong, Yu Xinghe, Shan Xin, et al. Provenance and sedimentary facies of He8 member of Xiashihezi Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2016, 40(3): 51-60.]
- [18] 贺小龙. 陕西省富县直罗组沉积环境分析[D]. 西安:长安大学, 2015. [He Xiaolong. Depositional environment of Zhiluo Formation in Fuxian Shaanxi province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.]
- [19] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- [20] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/2/3): 65-82.
- [21] 乔雨. 豫西宜阳地区晚二叠世一早三叠世沉积环境演化及其构造意义[D]. 焦作:河南理工大学, 2017. [Qiao Yu. The sedimentary environment evolution and its tectonic significance of Late Permian to Early Triassic in Yiyang county, western Henan province [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.]
- [22] 师晶,黄文辉,吕晨航,等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥岩地球化学特征及地质意义[J]. *石油学报*, 2018, 39(8): 876-889. [Shi Jing, Huang Wenhui, Lü Chenhang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing area in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(8): 876-889.]
- [23] Ernst W. *Geochemical facies analysis*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1970: 1-5.
- [24] 范玉海,屈红军,王辉,等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用:以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 382-389. [Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: A case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 382-389.]
- [25] 陈晶,黄文辉,何明倩. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组一下石盒子组泥岩元素地球化学特征[J]. *现代地质*, 2018, 32(2): 240-250. [Chen Jing, Huang Wenhui, He Mingqian. Elemental geochemistry characteristics of mudstones from Benxi Formation to Lower Shihezi Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2018, 32(2): 240-250.]
- [26] 徐勇航,赵太平,张玉修,等. 华北克拉通南部古元古界熊耳群大古石组碎屑岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质论*

- 评, 2008, 54(3): 316-326. [Xu Yonghang, Zhao Taiping, Zhang Yuxiu, et al. Geochemical characteristics and geological significances of the Dagushi Formation siliciclastic rocks, the Paleoproterozoic Xiong'er Group from the southern North China Craton[J]. Geological Review, 2008, 54(3): 316-326.]
- [27] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-310, 341. [Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-310, 341.]
- [28] 徐莉, 张成君, 贾松海, 等. 河南济源大峪槐圪塔岭二叠—三叠系元素地球化学特征及古环境[J]. 地质学报, 2015, 89(1): 137-148. [Xu Li, Zhang Chengjun, Jia Songhai, et al. Element geochemistry and Palaeoenvironment of Permian-Triassic stratum in the Huaigeda Hill of Dayu Town Jiyuan Basin, Henan province[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(1): 137-148.]
- [29] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. Geological Society of America Special Papers, 1993, 284: 21-40.
- [30] McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(6): 1153-1177.
- [31] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [32] Chu D L, Tong J N, Bottjer D J, et al. Microbial mats in the terrestrial Lower Triassic of North China and implications for the Permian-Triassic mass extinction[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 474: 214-231.
- [33] 郑德顺, 祁帅帅, 杨文涛, 等. 豫西宜阳地区上二叠统孙家沟组上段钙质结核成因及其对古气候的指示意义[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 22-31. [Zheng Deshun, Qi Shuashuai, Yang Wentao, et al. The origin of calcareous concretions in the upper part of the Sunjiagou Formation of Upper Permian in Yiyang area, western Henan province and its indicating significance to paleoclimate[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 39(2): 22-31.]

Sedimentary Environment and Paleoclimate Variations of the Sunjiagou Formation at the P-Tr Boundary in Xingyang Area, Western Henan Province

ZHENG Wei^{1,2,3}, LIU YunLong¹, QI YongAn^{1,2,3}, XING ZhiFeng^{1,2,3}, LI Da^{1,2,3}, FU YuXin¹, LI WanYing¹, XU Xin¹

1. Institute of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

2. Key Laboratory of Biogenetic Traces & Sedimentary Minerals of Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China

3. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China

Abstract: The terrestrial clastic rocks of the Sunjiagou Formation exposed in the Wanshan area, Xingyang, preserve the continental sedimentation at the Permian-Triassic boundary, which is helpful for studying the changes of continental sedimentary environment and paleoclimate at the mass extinction at that time. This comprehensive study is based on measurements of geological profiles of the sedimentary environment and paleoclimatic changes in the Sunjiagou Formation, combining traditional lithological analysis, grading analysis, sedimentary facies analysis and trace element geochemical analysis. It is concluded that the sedimentary environment of the Sunjiagou Formation was mainly fluvial in the early and middle period, then was transformed into a continental shallow-water oxygen-rich environment of delta plain and delta front subfacies. The paleoclimate of the Sunjiagou Formation was warm and humid, with several dry and hot changes occurring in the middle, and severe weathering of the whole formation.

Key words: P-Tr boundary; Sunjiagou Formation; terrestrial sedimentary environment; paleoclimate; Xingyang