

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.298>



碎屑岩潜山储层埋藏—抬升—再埋藏的成岩响应：以济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组为例

王晔磊¹, 邱隆伟^{1,2}, 刘卫红^{3*}, 杨勇强^{1,2}, 滕宝刚⁴, 吴宛秋¹

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580
2. 中国石油大学深层油气重点实验室, 山东青岛 266580
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
4. 中国石化胜利油田桩西采油厂, 山东东营 257000

摘要: 为深化对碎屑岩潜山储层的认识, 以济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层为例, 利用岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜、阴极发光、碳氧同位素分析和流体包裹体等技术, 结合潜山成山过程、埋藏演化史和构造演化史, 对储层的埋藏—抬升—再埋藏过程中的成岩响应进行研究。研究发现, 济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层成岩演化从早到晚经历了三个阶段: 阶段 I: 晚三叠世与早、中侏罗世, 受印支运动影响, 孤北潜山抬升二叠纪地层遭受剥蚀, 以地层浅埋藏和抬升暴露剥蚀为主要成岩环境, 以长石溶蚀、高岭石胶结、①期石英胶结以及褐铁矿侵染发育为主要成岩响应。阶段 II: 晚侏罗世与白垩纪, 郯庐断裂带发生左旋走滑运动, 强烈的构造活动伴随活跃的火山活动, 与火山活动相伴生热液活动对储层改造巨大, 以发育①期碳酸盐胶结、②期石英胶结、黄铁矿、绢云母、绿泥石、长柱状磷灰石为成岩响应。阶段 III: 新生代, 在区域扭张应力的作用下, 孤北潜山埋深增大, 有机质成熟度升高, 以有机酸主导的酸性成岩环境为主, 以②期碳酸盐胶结、石英溶蚀过渡到碳酸盐溶蚀、晚期长石溶蚀为主要成岩响应。孔隙演化定量恢复结果显示, 阶段 I 和 II 压实作用与胶结作用对孔隙度的影响较大, 孔隙度从 40% 降至 19%; 阶段 III 早期碱性环境下成岩作用对储层产生破坏性作用, 使储层孔隙度从 19% 降至 6.7%; 之后酸性环境下溶蚀改造使储层孔隙度从 6.7% 升高到 9.1%; 次生溶蚀孔隙发育且保存较好。

关键词: 成岩作用; 构造演化; 埋藏史; 上石盒子组; 孤北潜山; 油气地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2023)04-1481-15

收稿日期: 2022-03-04

Diagenetic Response of Clastic Buried Hill Buried-Uplifted-Reburied: A Case Study from Upper Shihezi Formation in Permian of Gubei Buried Hill of Jiyang Depression

Wang Yelei¹, Qiu Longwei^{1,2}, Liu Weihong^{3*}, Yang Yongqiang^{1,2}, Teng Baogang⁴, Wu Wanqiu¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41972099); 国家科技重大专项 (Nos. 2017ZX05009-002, 2017ZX05072-002); 中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性战略性技术攻关项目“含油气盆地铀矿勘查评价与高效开采技术研究”(No. 2021DJ5303)。

作者简介: 王晔磊(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为沉积学及储层地质学。ORCID:0000-0001-8880-0333. E-mail: 15610046181@163.com

* 通讯作者: 刘卫红, E-mail: lweihong05@petrochina.com.cn

引用格式: 王晔磊, 邱隆伟, 刘卫红, 杨勇强, 滕宝刚, 吴宛秋, 2023. 碎屑岩潜山储层埋藏—抬升—再埋藏的成岩响应: 以济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组为例. 地球科学, 48(4): 1481-1495.

Citation: Wang Yelei, Qiu Longwei, Liu Weihong, Yang Yongqiang, Teng Baogang, Wu Wanqiu, 2023. Diagenetic Response of Clastic Buried Hill Buried-Uplifted-Reburied: A Case Study from Upper Shihezi Formation in Permian of Gubei Buried Hill of Jiyang Depression. *Earth Science*, 48(4): 1481-1495.

2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

4. Zhuangxi Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China

Abstract: In this paper it aims to gain new insights into clastic buried hill reservoirs. For this purpose, the Permian sandstone reservoirs in Upper Shihezi Formation, Gubei low buried hill, Jiyang depression, was taken as the object. Referring to the diagenesis in the process of burial-lifting-reburning of the reservoirs, with the aid of techniques like core observation, casting sheet observation, scanning electron microscopy (SEM), cathode luminescence, carbon-oxygen isotope analysis and fluid inclusion. The results show that: It is found that the diagenetic evolution of the sandstone reservoir of Upper Shihezi Formation of Permian in Gubei buried hill of Jiyang Depression has gone through three stages from early to late. Stage I: Late Triassic and Early-Middle Jurassic, Gubei buried hill was uplifted and the Permian strata were denuded by the Indosinian movement, and the main diagenetic environment was shallow burial and uplift exposure denudation. The main diagenetic responses are feldspar dissolution, kaolinite cementation, stage ① quartz cementation and limonite invasion. Stage II: Jurassic and Cretaceous, the sinistral strike-slip movement occurred in the Tancheng-Lujiang fault zone, the strong tectonic activity accompanied by active volcanic activity, and the hydrothermal activity associated with volcanic activity greatly affected the reservoir. The diagenetic response is the development of stage ① carbonate cementation, stage ② quartz cementation, pyrite, sericite, chlorite and long columnar apatite. Stage III: Cenozoic, under the action of regional transtensional stress, the burial depth of Gubei buried hill increased, the maturity of organic matter increased, and the diagenetic environment was dominated by organic acid. The diagenetic response was mainly from carbonate cementation and quartz dissolution in stage ② to carbonate dissolution and feldspar dissolution in late stage. The results of quantitative restoration of pore evolution show that the compaction and cementation in stages I and II have a great influence on the porosity, which decreases from 40% to 19%, and the diagenesis in early alkaline environment in stage III has a destructive effect on the porosity of the reservoir, which decreases from 19% to 6.7%. After that, the porosity of the reservoir increased from 6.7% to 9.1% due to the dissolution reconstruction in acidic environment, and the secondary dissolution pores were developed and well preserved.

Key words: diagenesis; burial history; tectonic evolution; Upper Shihezi Formation; Gubei low buried hill; petroleum geology.

0 引言

潜山是指基底岩石经历构造抬升剥蚀、风化之后再次接受沉积形成的一种地貌,其最早见于赛德尼·鲍尔斯(Sidney Powers)1922年发表的论文《潜山及其在石油地质学中的重要性》中.1975年在任4井获得日产千吨的高产工业油流,发现了任丘潜山特大型高产油田(刘畅,2017),掀起了国内潜山油气藏勘探的热潮.近年来,随着油气需求增加和油气勘探工作深入,渤海湾盆地潜山油气藏再度成为众多学者和勘探家关注的重点,按照潜山基岩类型可将潜山分为碳酸盐岩潜山、碎屑岩潜山、火山碎屑岩潜山、火山岩潜山和变质岩潜山等,不同类型潜山储层特征也不尽相同.任丘潜山蓟县系高于庄组—雾迷山组白云岩储层储集空间类型可分为孔隙复合型、裂缝—孔隙型和孔隙型,优质储层发育受原始沉积环境(微生物礁滩)和后期成岩作用(印支期以来的构造隆升、破裂及溶蚀作用)共同控制(李朋威等,2020).南堡潜山带寒武系—奥陶系碳酸盐岩潜山储层储集空间以溶蚀孔洞为主,主要储

层类型为裂缝—孔洞型,裂缝是沟通孔洞的重要通道,碳酸盐岩沉积相带、成岩作用(主要指岩溶作用)、构造作用是碳酸盐岩潜山优质储层发育的主控因素(曹中宏等,2015;王晔磊等,2016).兴隆台太古界花岗片麻岩潜山储层储集空间类型主要为构造裂缝和破碎粒间孔,优质储层主要受构造作用强弱以及暗色矿物含量影响(宋柏荣等,2011).黄骅坳陷中生界火山岩潜山储层储集空间类型可分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝3大类,储层成岩作用是控制优质储层发育的重要因素,主要包括凝固结壳成岩阶段、岩浆期后热液阶段、表生成岩阶段和埋藏成岩作用,不同成岩作用对应形成不同的储集空间类型(孟凡超等,2021).北大港中生界碎屑岩潜山储层储集空间以次生孔隙为主,原生孔隙及裂缝发育较少,储层发育主要受控于沉积作用、成岩作用和构造作用(李祖兵等,2020).“十二五”期间,大港油田在上古生界陆续获得油气勘探的重大发现,相继在王官屯潜山和北大港潜山上古生界碎屑岩储层中获工业油流,上古生界已成为大港油田重要的储

量接替领域(侯中帅等,2017).以黄骅拗陷歧北—东光地区二叠系碎屑岩储层为例,其储集空间有原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔及其他矿物的溶蚀孔隙、溶缝及裂缝等类型,储层发育受控于沉积作用、成岩作用和构造作用.其中构造作用形成的断裂助推了地层发生快速埋深,断裂的存在不仅为地下流体与岩石颗粒发生溶蚀作用提供了场所,也为溶蚀作用发生所需流体及溶蚀后的流体流动提供了通道(李祖兵等,2020).可以看出,潜山储层所经历的复杂成岩过程成为制约潜山油气藏勘探的关键点.

但针对碎屑岩潜山,大家往往只注重“碎屑”而忽略“潜山”,潜山的构造活动既包含潜山的构造形态,更包含构造演化过程对砂岩储层成岩作用的影响.济阳探区针对上古生界碎屑岩潜山研究工作相对较少,且主要集中于烃源岩及其演化(李增学等,2004;姚海鹏,2015)、煤成气及致密气成藏模式(白群丽,2003;金强等,2009)、储层岩石学特征及成岩作用定性描述(常国贞等,2002;彭传圣,2005;杨超和陈清华,2005)等.针对碎屑岩潜山储层在多期构造运动背景下的成岩响应缺乏深入研究.碎屑岩潜山因其埋藏过程多阶段和成岩流体多成因而形成的储层非均质性强,济阳拗陷上古生界碎屑岩潜山钻探失利井中,储层的原因占比高.因此,针对济阳拗陷上古生界碎屑岩潜山储层成岩作用研究对于降低勘探风险具有现实意义.

本文在前人研究基础上,利用岩心观察、铸体薄片鉴定、X射线衍射、扫描电镜及能谱等分析测试手段,结合储层岩石学特征,对济阳拗陷孤北潜山二叠系致密砂岩储层成岩作用进行半定量研究,并以构造活动为主线探讨了济阳拗陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层埋藏—抬升—再埋藏过程的成岩响应,以为碎屑岩潜山勘探开发提供参考.

1 区域地质概况

孤北潜山位于渤海湾盆地济阳拗陷东北部(图1a),北以埕东断层为界,南以孤北断层为界,西接孤西断层,向东过渡至孤北洼陷,整体上为受孤西断层、埕南断层和孤北断层控制形成的南倾鼻状断块构造,边界基底断裂和次级断层将孤北低潜山切割为4个断块,面积约200 km²(图1b).孤北潜山上石盒子组发育一套曲流河沉积体系(彭传圣,2005),其中上石盒子组中部奎山段曲流河边滩微相和河道底部滞留沉积微相发育大套储集砂体,砂岩厚度

累计可达54 m,是研究区主要的油气勘探目的层(图1c).

2 孤北潜山成山过程与埋藏史

在前人研究基础之上,通过对研究区AB构造演化剖面(图1b)以及孤北古1井埋藏史进行分析,明确孤北潜山成山过程,为恢复研究区目的层段在不同构造活动阶段的成岩响应过程提供依据.

2.1 孤北潜山成山过程

孤北潜山现今构造格局是经过了印支、燕山和喜山3期构造运动后形成的,包括印支期挤压、燕山期到喜山早期挤压转拉张构造演化而定型(常国贞等,2002).孤北潜山晚古生代发育在稳定的华北克拉通内部,构造运动以整体升降为特征,这一阶段华北地台内部构造差异与火山活动较弱.早、中三叠世研究区属于大型内陆沉积盆地(杨超和陈清华,2005),基本继承了晚古生代的构造格局和沉积特点,发育一套以河湖相、沼泽相为主的红色、杂色砂页岩、泥质岩建造.

下列构造事件对于孤北潜山的形成至关重要:

晚三叠世,受印支运动影响,济阳拗陷在扬子板块与华北板块挤压碰撞所产生的挤压应力场作用之下,孤北潜山抬升剥蚀;早、中三叠世沉积的地层几乎剥蚀殆尽,部分二叠纪地层也遭受剥蚀;同时济阳拗陷内产生一系列倾向为SW向、走向为NW向的逆冲断层,其包括孤北潜山的控山断层—孤西断层(王世虎等,2004).

早—中侏罗世,扬子板块与华北板块的碰撞挤压有所减弱,但太平洋板块对欧亚板块的俯冲消减作用开始逐渐增强,因此华北地区整体仍以抬升剥蚀为主,但孤北潜山此时属于山间盆地,沉积了一套河湖相碎屑岩建造,其与下伏上古生界角度不整合接触.

晚侏罗世—白垩纪,太平洋板块NNW向俯冲活动使郯庐断裂带发生左旋走滑运动,促使济阳拗陷区前期形成的NW向逆冲断层反转为一系列正断层(孤西断层).该时期孤北潜山地层记录由红色碎屑岩和大套安山岩构成,这表明当时火山活动相当活跃,伴随的热液活动对储层物性产生巨大影响(陈旭辉,2013).

新生代,受郯庐断裂带右旋走滑构造运动的影响,在区域扭张应力的作用下,形成了一系列NE、EW向拉张断层,孤北断层、埕东断层以及孤北潜山

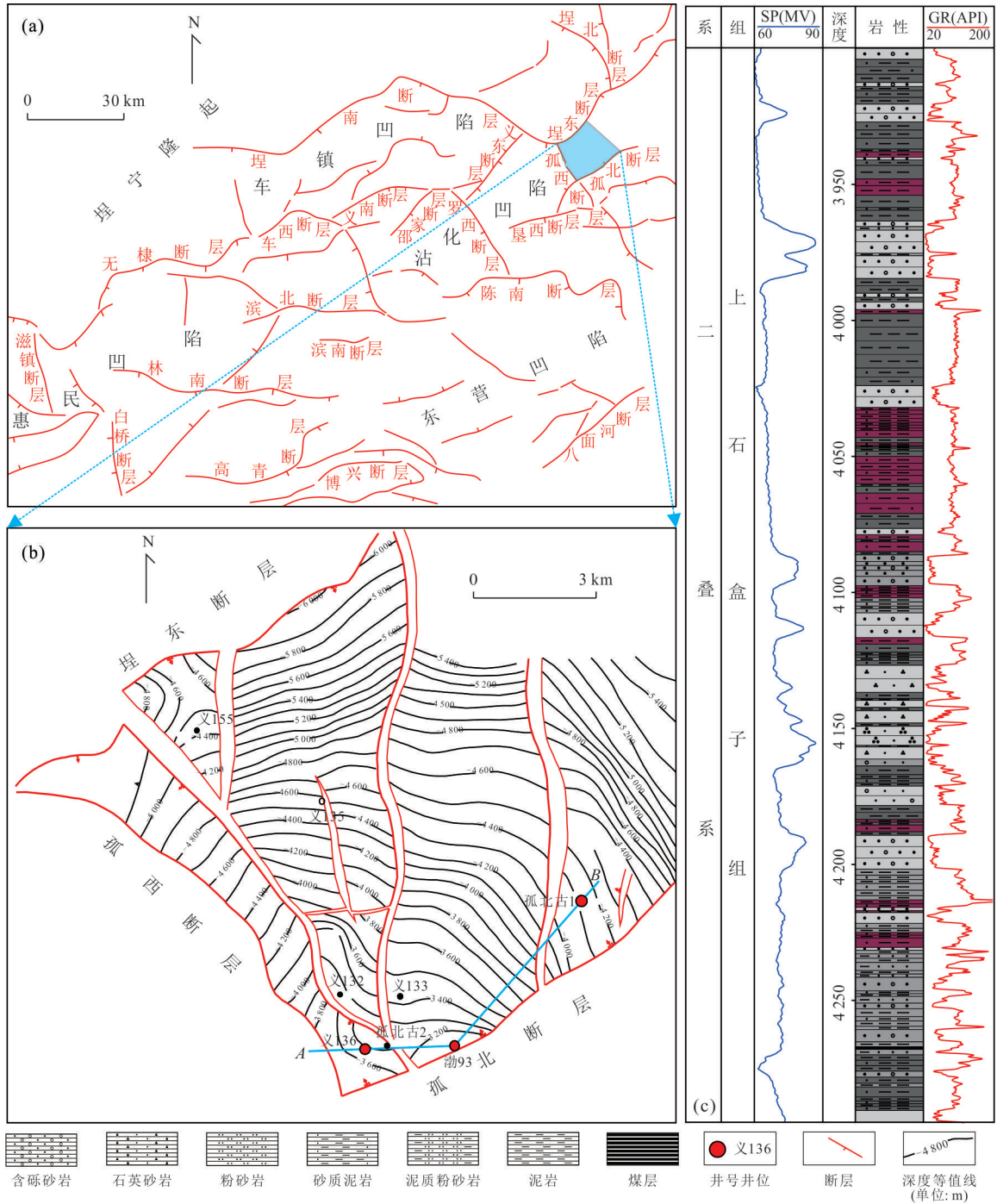


图 1 孤北潜山构造位置图(a~b)和综合柱状图(c)

Fig.1 Tectonic setting (a~b) and integrated histogram (c) of the Gubei buried hill

内部的3条主要断层均是这一时期的产物(陈旭辉, 2013).

2.2 埋藏史与成岩流体

埋藏史反映的是构造作用引起的沉降和沉积负载作用引起的沉降之和,因此构造演化过程极大地影响着区域埋藏史特征.根据埋藏史与成岩流体类型将孤北潜山二叠系上石盒子组储层划分为3个

成岩阶段:地层浅埋藏+地层抬升暴露剥蚀阶段(阶段I);火山活动阶段(阶段II)和再埋藏阶段(阶段III)(图2c),下文为阶段划分依据.

阶段I:三叠世、侏罗世时期,二叠系储层先后经历了浅埋藏—抬升剥蚀遭风化淋滤—再埋藏的过程;整个过程中,二叠系储层埋深小于2 000 m,其下伏煤系烃源岩 R_o 整体小于0.8(张善文等,2009),

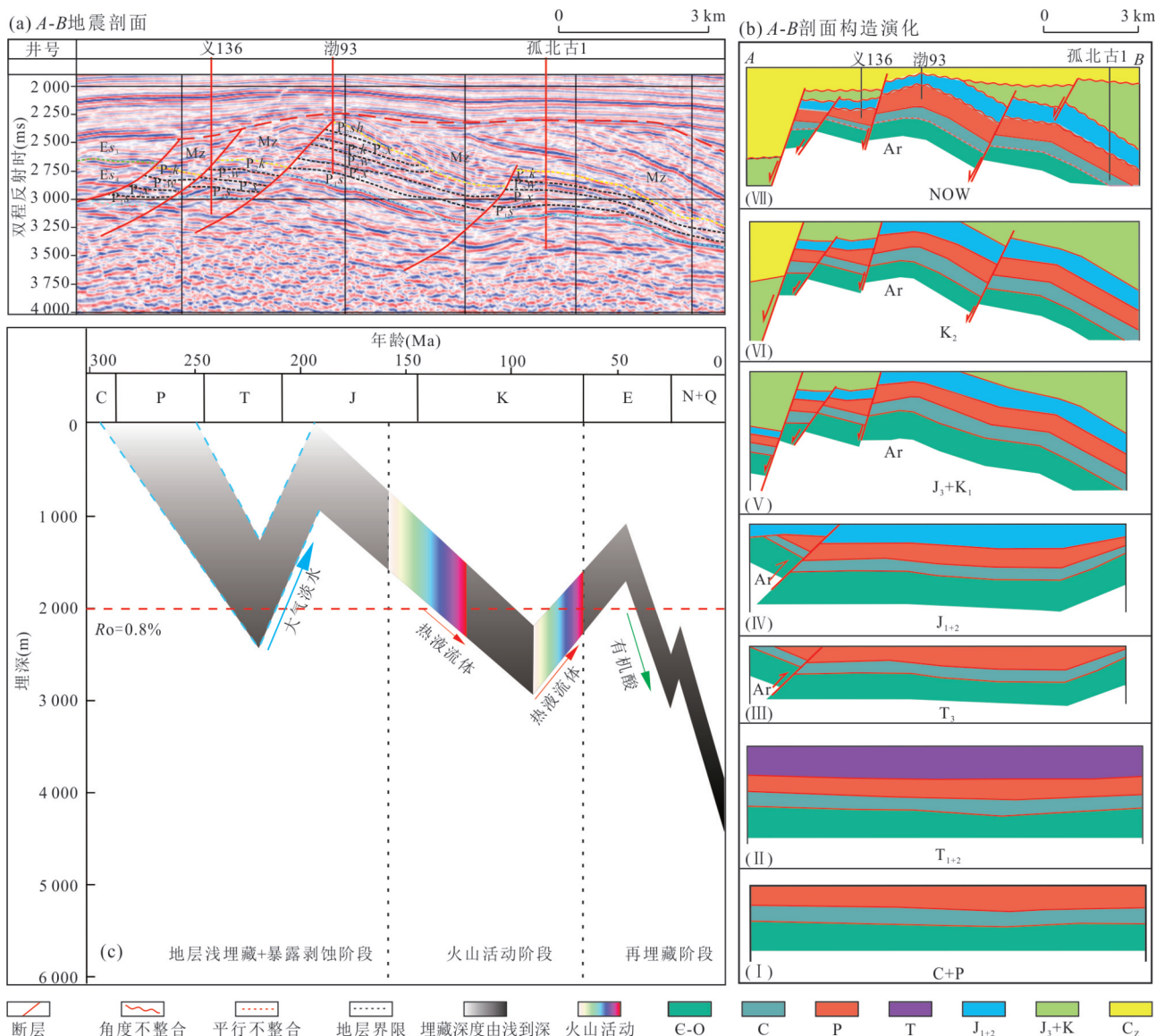


图 2 孤北潜山构造演化(a~b)与埋藏史(c)

Fig.2 Tectonic evolution (a-b) and the burial history (c) of the Gubei buried hill

受有机酸流体影响不大;大气淡水对二叠系砂砾岩的直接淋滤是这一阶段成岩面貌的主控因素。

阶段 II :白垩世时期,华北地区火山活动剧烈,发育大规模的岩浆侵入(万丛礼等,2011).孤北潜山石炭系一二叠系和侏罗系均发育火成岩,平均单层厚度约 2 m,以闪长玢岩和煌斑岩为主(表 1);孤北古 1 井区闪长玢岩面积和厚度最大,该岩体东西长 4.8 km,南北最宽 3.6 km,面积约 13 km².前人对孤北潜山部分岩浆岩样品进行 K-Ar 年龄分析(金强等,2011),认为该地区侵入岩主要发育早白垩世早期和晚白垩世.除此之外,孤北古 1 井 4 017 m 处发育闪长玢岩,煤的 Ro 值高达 6.28%,可能是岩浆的侵入对此煤层的有机质演化起到促进作用(望畅

等,2022);通过对这套闪长玢岩稀土元素进行分析,认为孤北地区中生代受到古太平洋板块对欧亚板块的俯冲和华北板块与扬子板块碰撞作用的影响,表现出地幔上隆而产生热事件,来自地幔深部的富含挥发组分和不相容元素的流体沿构造隆起带向上运移,轻稀土和大离子亲石元素的富集型地幔导致大规模钾质岩浆活动(金强等,2009),这亦可佐证孤北地区在中生代受到强烈的火山活动影响.阶段 II 除发育大规模火山活动之外,由于二叠系储层埋深加大(整体大于 2 000 m),其下伏煤系烃源岩 Ro 大于 0.8,这一过程产生的有机酸对储层会有改造作用,但由于大量热液矿物的产生,热液流体对二叠系储层的改造仍是这一阶段成岩面貌的

表 1 孤北潜山上古生界地层侵入岩发育情况

Table 1 Development of intrusive rocks of the Gubei buried hill

井号	侵入岩深度(m)	侵入层位	岩性	侵入时代
渤古 4 井	4 340	C-P	煌斑岩	早白垩世
渤古 401 井	3 896	C-P	闪长玢岩	晚白垩世
孤北古 1 井	4 017	C-P	闪长玢岩	83.87±1.67 Ma
孤北古 2 井	3 187	C-P	闪长玢岩	晚白垩世
孤北古 3 井	3 476	C-P	闪长玢岩	晚白垩世
义 136 井	3 856	C-P	煌斑岩	112.98±1.59 Ma

注:孤北古 1 井与义 136 井侵入岩 K-Ar 年龄分析据文献万丛礼等(2011),金强等(2011).

主控因素.

阶段 III: 新生代以来,孤北潜山二叠系储层虽然仍经历两次抬升,但整体埋深较大,地层温度较大(最高地温约 178 °C),下伏煤系烃源岩现今成熟度 R_o 值为 1.81%,为孤北潜山带主要的成藏时期(张善文等,2009).碎屑岩储层成岩过程中,烃源岩中有机质热演化能够释放大量有机酸并强烈溶蚀铝硅酸盐和碳酸盐矿物.前人曾对挪威大陆架烃源岩(III 型干酪根)进行热裂解试验,在生油窗阶段,总产酸率可达 0.88~1.36 mg/g(远光辉等,2013).因此,此阶段有机酸流体对二叠系储层的改造是这一阶段成岩面貌的主控因素.

3 储层成岩作用与成岩序列

研究区二叠系碎屑岩潜山砂岩经历了强烈的成岩作用,潜山经历的复杂构造运动决定了其成岩过程也十分复杂.本文挑选了现象明显且具有代表性的 5 口井对研究区成岩作用进行说明.

3.1 压实作用

孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩现今埋深大于 3 500 m,压实作用较强;通过镜下统计总石英含量(颗粒+石英岩岩屑)可达 91%,平均总石英含量约 89.7%,高刚性颗粒可增强储层抗压实能力,但储层埋深大,压实作用强烈,其主要表现为:①塑性颗粒(云母)受压变形(图 3a);②颗粒呈现线-凹凸接触(图 3a);③塑性颗粒挤压变形发生假杂基化(图 3b).

3.2 胶结作用

通过铸体薄片、阴极发光薄片和扫描电镜观察,结合黏土矿物 X 衍射分析,认为孤北潜山二叠

系上石盒子组砂岩储层区主要发育的胶结作用类型包括碳酸盐矿物胶结、黏土矿物胶结、黄铁矿胶结和石英胶结等,各类胶结物含量差异较大,具体特征如下.

3.2.1 碳酸盐矿物胶结 碳酸盐胶结物在研究区具有总体含量较低、局部富集的特征,碳酸盐富集段多为奎山段粗粒石英砂岩.研究区碳酸盐胶结类型主要分为两类,包括铁方解石和连晶方解石两类;粗晶铁方解石多在裂缝中沉淀结晶(图 3c),晶体最大可达 500 μm ,且部分对周围石英发生交代,其阴极发光图像中呈现暗红色.连晶方解石多发育于之前形成的长石溶蚀孔隙或高岭石晶间孔中(图 3d),说明方解石形成于一期较强的溶蚀之后,其阴极发光图像中呈现亮红色或亮黄色.根据矿物空间关系认为,连晶方解石的发育较粗晶铁方解石晚.这两类碳酸盐含量差异较大,其中连晶方解石占总碳酸盐胶结物的 87%,粗晶铁方解石占总碳酸盐胶结物的 13%.

3.2.2 黄铁矿胶结 孤北潜山二叠系上石盒子组黄铁矿胶结富集,特别在孤北古 1 井地区规模较大,其以连片状孔隙式胶结或团簇状为主(图 3e),且可见颗粒多呈漂浮状,这类黄铁矿发育规模大,在岩心尺度上可观察到大量黄铁矿在岩心破裂面富集(图 3f).这一产状的黄铁矿多被认为是中温热液矿物,其形成温度约为 200~300 °C(卢欢等,2020;廖计华等,2022).

3.2.3 黏土矿物胶结 孤北潜山二叠系上石盒子组黏土矿物胶结包括高岭石、绿泥石、伊利石和伊蒙混层,通过 XRD 测试数据显示,各类黏土矿物质量分数变化较大,其中高岭石变化范围为 5%~65%,平均值为 40.8%;绿泥石变化范围为 2%~70%,平均值为 27.6%;伊利石变化范围为 0~51%,平均值为 20.95%;伊蒙混层变化范围为 0~29%,平均值为 10.27%.铸体薄片、阴极发光图像和扫描电镜观察,自生高岭石多充填于粒间溶孔和长石溶蚀孔隙中,其形成与长石溶蚀有关,高岭石在研究区分布范围极广,扫描电镜下多呈板状或书页状集合体(图 3g),晶形较好,阴极发光图像呈深蓝色(图 3d).研究区绿泥石分布广泛,但晶型较差,多表现为孔隙充填,扫描电镜下可见少量鳞片状绿泥石环绕石英颗粒生长(图 3i);伊利石和伊蒙混层在研究区分布较高岭石与绿泥石少,XRD 测试数据显示孤北潜山二叠系伊蒙混层比变化范围为 0~40%,反映研究

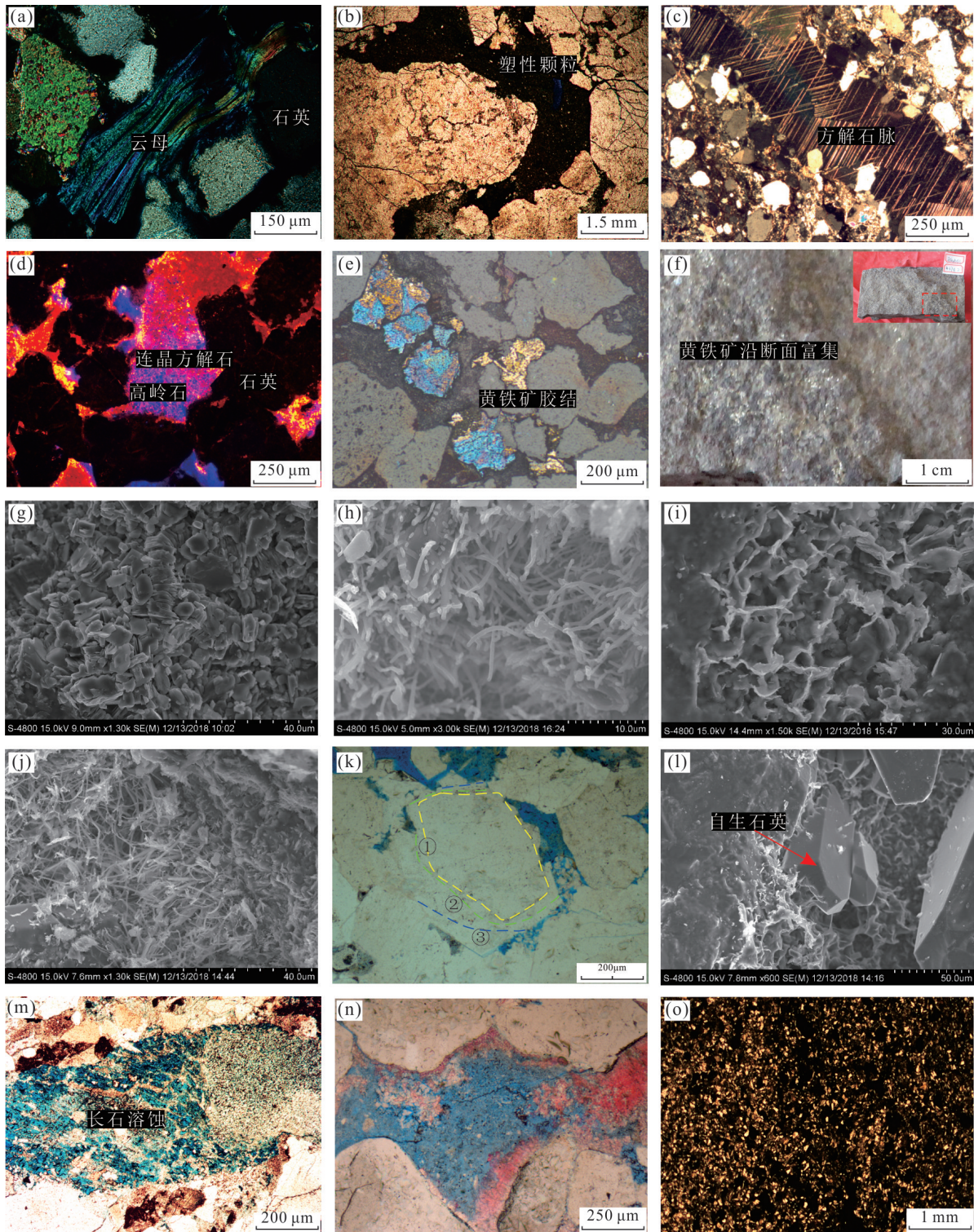


图 3 孤北地区上石盒子组主要成岩特征

Fig.3 Main diagenesis characteristics of Upper Shihezi Formation of Permian in Gubei buried hill

a. 颗粒线接触, 云母受压变形, 孤北古 3 井, 4 084.7 m, 正交光; b. 塑性颗粒假杂基化, 孤北古 2 井, 3 520.1 m, 单偏光; c. 方解石脉, 孤北古 1 井, 4 076.8 m, 单偏光; d. 连晶方解石发生溶蚀, 其内部充填高岭石, 孤北古 2 井, 3 690.7 m, 阴极发光; e. 粒间黄铁矿孔隙式胶结, 孤北古 1 井, 4 124.5 m, 反射光; f. 黄铁矿沿断面富集, 孤北古 1 井, 4 374.2 m, 岩心; g. 板状高岭石胶结, 孤北古 1 井, 4 075.6 m, 扫描电镜; h. 丝缕状伊利石, 孤北古 1 井, 4 076.8 m, 扫描电镜; i. 叶片状绿泥石, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 扫描电镜; j. 伊蒙混层中以伊利石为主, 孤北古 1 井, 4 403.0 m, 扫描电镜; k. 石英次生加大, 孤北古 1 井, 4 124.5 m, 单偏光; l. 颗粒间发育自生石英, 孤北古 1 井, 4 125.0 m, 扫描电镜; m. 长石溶蚀, 残晶内发育高岭石, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 单偏光; n. 方解石胶结物溶蚀, 孤北古 1 井, 4 074.7 m, 单偏光; o. 褐铁矿浸染, 孤北古 1 井, 4 405.5 m 单偏光

区较强的成岩作用。伊利石和伊蒙混层扫描电镜下多呈丝缕状或蜂窝状(图 3h, 3j), 特征较明显(庞小军等, 2022)。

3.2.4 硅质胶结 孤北潜山二叠系上石盒子组硅质胶结较发育, 在孤北古 1 井地区自生石英尤为发育, 晶型较好, 硅质胶结一类以石英次生加大边的形式产出, 最大厚度可达 50 μm , 部分石英次生加大边与石英颗粒间可见尘边及黏土矿物(图 3k)。另一类是晶型较好的微晶石英, 扫描电镜照片可见其往往生长在绿泥石外(图 3l)。通过测定硅质胶结物盐水包裹体均一温度(图 6b), 进一步证实研究区砂岩储层存在 3 期石英次生加大, 第 1 期硅质胶结物均一温度分布范围为 90~100 $^{\circ}\text{C}$; 第 2 期硅质胶结物均一温度大于 170 $^{\circ}\text{C}$; 第 3 期硅质胶结物均一温度分布范围为 110~130 $^{\circ}\text{C}$; 其中第 3 期硅质胶结物最为发育。长石溶蚀、石英压溶、硅酸盐矿物溶解以及黏土矿物转化等释放的 SiO_2 是硅质胶结物的主要物质来源(张大智等, 2021)。

3.3 溶蚀作用

孤北潜山二叠系上石盒子组储层经历了酸—碱流体交替溶蚀改造, 溶蚀矿物多样, 以长石溶蚀、凝灰质杂基溶蚀、方解石胶结物溶蚀等酸性溶蚀为主, 也可见少量的石英及其加大边的碱性溶蚀。溶蚀作用极大地改善了储层的储集物性, 不同矿物组分溶蚀强度表现出较大差异; 研究认为孤北潜山二叠系上石盒子组储层发育两期溶蚀作用, ①早期溶蚀是由于印支运动, 二叠系地层经历了一次抬升运动, 研究区缺失三叠系地层且二叠系上统石千峰组以及上石盒子组顶部的孝妇河段都遭受了不同程度剥蚀, 在这次浅埋藏和暴露期间, 受大气淡水淋滤作用发生以长石溶蚀为主的溶蚀作用, 形成部分长石溶孔(图 3m)。②埋藏期溶蚀主要形成于喜山期, 其表现为晚期形成的连晶方解石发生溶蚀, 其内部未发现高岭石等黏土矿物充填。研究区二叠系储层内的天然气主要来自于下伏的石炭系含煤层系, 生烃高峰主要集中在喜山早期(张善文等, 2009), 期间产生的大量酸性流体造成深埋藏阶段连晶方解石的溶蚀(图 3n)。值得注意的是, 早期溶蚀发生在开放条件下, 大气淡水主导的表生淋滤是这一期溶蚀的主要成因, 这决定了其远离烃源岩和低矿化度。在这种情况下, 由于长石溶蚀的产物不能被有效带出储集层而在溶蚀孔隙中残留大量黏土矿物(图 3m), 造成二叠系与上覆地层不整合面之

下粘土含量高(图 4)。相反, 晚期溶蚀由于储层埋深加大、温度升高、矿化度升高以及长石颗粒表面积增大, 会对溶蚀产生积极的影响, 且研究区断裂系统和裂缝发育, 此条件下, 溶孔内部往往表现为无粘土矿物残留(图 3n)。

3.4 成岩演化序列

孤北潜山二叠系上石盒子组现今埋深变化范围较大, 在 3 670~4 700 m 之间, 井底温度略大于 160 $^{\circ}\text{C}$, 伊蒙混层中的蒙脱石含量小于 15%, 同时实测镜质体反射率 R_o 平均值为 1.75%, 根据碎屑岩成岩作用阶段划分的行业标准(2003), 认为现今储层主体演化至中成岩 B 阶段。根据矿物之间的充填、切割、交代等现象, 以及矿物的形成条件恢复研究区目的层段成岩演化序列: 长石溶蚀/高岭石胶结/①期石英胶结→①期碳酸盐胶结/②期石英胶结/黄铁矿胶结→②期碳酸盐胶结/碳酸盐溶蚀/晚期长石溶蚀/可溶性杂基溶蚀/③期石英胶结, 伴随成岩作用的加深, 蒙脱石伊利石化与压实作用贯穿始终, 但受到自生矿物形成所需较长时间以及物质平衡原理影响, 因此不同的成岩过程存在重叠。

4 储层埋藏—抬升—再埋藏的成岩响应

综合考虑孤北潜山带二叠系上石盒子组储层构造演化史、成山过程、埋藏史、主要成岩流体和成岩演化序列等多个因素, 将二叠系砂岩划分为 3 个主要成岩阶段: 阶段 I: 晚三叠世与早、中侏罗世, 为大气淡水主导的地层浅埋藏+地层抬升暴露剥蚀阶段。阶段 II: 晚侏罗世与白垩纪, 为热液流体主导的火山活动阶段。阶段 III: 新生代, 有机酸主导的再埋藏阶段。由于构造演化控制着潜山的形成以及流体的性质, 也是此次研究的主线, 且自生矿物形成所需较长时间, 无法对每一种成岩响应的绝对年龄进行测算。因此, 本次研究以构造演化为主要依据, 划分 3 个阶段及其界限。

4.1 大气淡水主导—地层浅埋藏+地层抬升暴露剥蚀阶段

此过程中, 济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层以表生成岩作用为主。该阶段的成岩响应表现为以下几个方面: ①大气淡水淋滤作用使长石及碳酸盐组分发生溶蚀或溶解, 长石溶蚀过程中所生成的高岭石等黏土矿物向下迁移并沉淀于不整合面附近的储层孔隙中, 研究区靠近不整合的储

层具有较低的长石含量、较高的高岭石含量、较大的孔隙度和渗透率,这是因为长石溶蚀产生的孔隙大多被与之伴生的高岭石所充填,不整合面之下,越靠近不整合面的地层其高岭石含量越高(邱隆伟等,2015).前人认为碳酸盐岩潜山表生岩溶带发育范围从30~200 m不等,通过对二叠系与上覆地层不整合面之下自生矿物和孔渗性的研究,认为孤北潜山上石盒子组碎屑岩潜山受大气淡水淋滤的影响范围不小于90 m(图4).②褐铁矿侵染是地表氧化的产物(图3o),也是表生作用阶段的标志之一,在不整合面附近有铁质侵染现象,其程度随其与不整合面距离的增加而降低.

4.2 火山活动阶段

火山活动及其伴随的热液流体具有很强的化学活动性,其可以单独或与围岩发生化学反应形成一系列特征矿物,通过对储层内部矿物组合和流体包裹体均一温度研究,认为该阶段的成岩响应为:①研究区储层内发育一种广泛的中—低温热液蚀变,黄铁绢英岩化(Alaa *et al.*,2000;Molenaar *et al.*,2008;张炳林,2018;赵睿,2016)(图5f,5g);即黄铁矿胶结、硅质胶结物、绢云母、绿泥石、铁方解石等热液矿物组合(图5a~5d),充填孔隙,致使储层孔隙度降低.前人对绢云母的形成温度有较为成熟的研究,其一般形成于200℃以上(小于350℃);研究区埋藏史最大埋藏温度约为160℃(张善文等,2009),不能满足绢云母的形成条件,因此认为这种黄铁绢英岩化的形成是受到热液流体活动的影响.②自形程度良好的长柱状磷灰石生长于溶蚀孔隙中,同一

深度段还发育大量的黄铁矿,说明磷灰石的形成可能与深部热液流体有关(侯中帅等,2021),而裂缝边缘的自形黄铁矿则可能是该过程的副产品(刘小洪等,2019)(图5e).③在研究区3口典型井的储层石英次生加大边以及微裂缝内发现76个次生气液两相包裹体(图5i~5k),其均一温度基本上分布在90~100℃、110~140℃和170℃共3个温度段(图6),其中,170℃以上的包裹体数量约占总数的14%,其大于研究区储层最大埋深温度,其也可做为储层受到热液活动影响的证据(刘小洪等,2019).④研究区储层微裂缝内,部分次生气液两相包裹体内部可观察到石盐子晶(图5l),且该包裹体均一温度为183℃,认为其为沿深大断裂上涌的高盐度热液形成.⑤利用牙钻对储集层砂岩中粗晶铁方解石(总计13个取样点)和连晶方解石(总计17个取样点)两类胶结物进行取样及碳氧同位素分析.碳氧同位素交汇图上投点(覃小丽等,2017)(图6)可以看出,粗晶铁方解石集中在低温热液成因碳酸盐岩和岩浆成因碳酸盐岩分布区,表明第1期粗晶铁方解石受低温热液和岩浆热液的共同作用,连晶方解石集中在有机质相关成因碳酸盐岩分布区,表明有机质作用导致了第2期连晶方解石的形成.

4.3 再埋藏阶段

此过程中,济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层始终处于埋藏状态,形成有机酸主导的成岩作用,但该阶段早期成岩环境为碱性,并逐渐过渡为酸性.该阶段的成岩响应表现为以下几个方面:①碱性成岩作用过程中,石英颗粒及其加大边

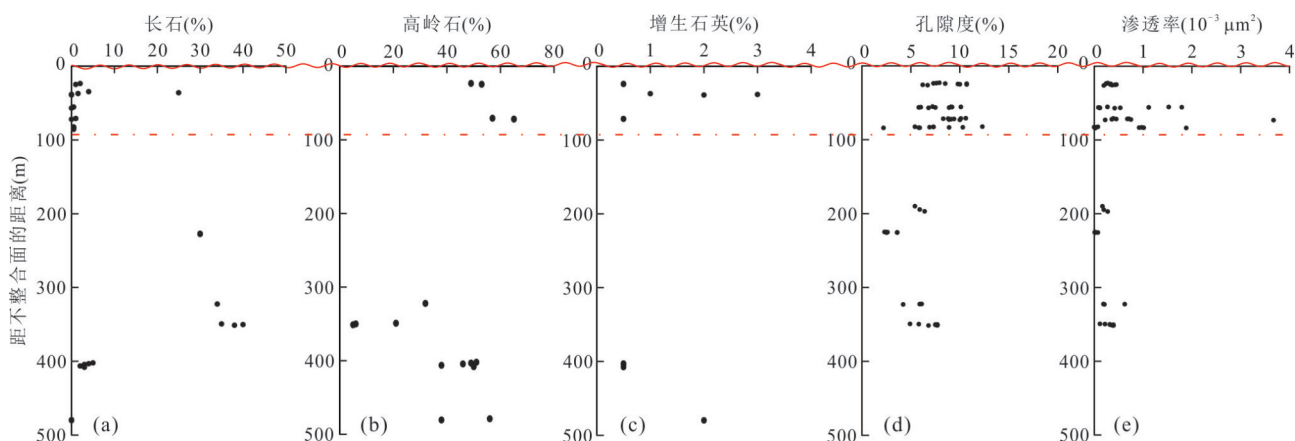


图4 孤北地区上石盒子组表生成岩证据

Fig.4 Evidence of fresh water leaching of Upper Shihezi Formation of Permian in Gubei buried hill

a. 研究区中生界不整合之下长石含量分布特征;b. 研究区中生界不整合之下高岭石含量分布特征;c. 研究区中生界不整合之下增生石英含量分布特征;d. 研究区中生界不整合之下孔隙度分布特征;e. 研究区中生界不整合之下渗透率分布特征

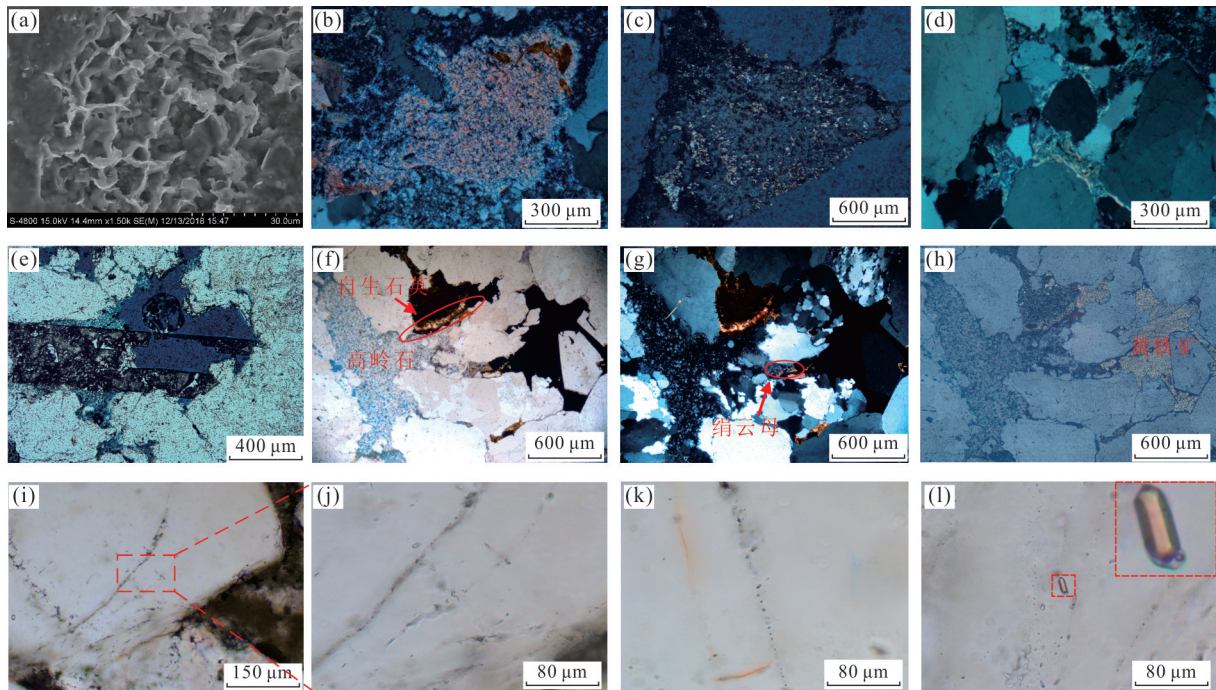


图 5 孤北地区上石盒子组热液活动证据

Fig.5 Evidence of hydrothermal activity of Upper Shihezi Formation of Permian in Gubei buried hill

a. 叶片状绿泥石, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 扫描电镜; b. 方解石, 孤北古 1 井, 4 124.5 m, 正交光; c. 黄铁矿, 孤北古 1 井, 4 124.5 m, 正交光; d. 绢云母, 孤北古 1 井, 4 076.8 m, 正交光; e. 磷灰石, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 单偏光; f~h. 高岭石晶间孔+黄铁矿胶结+自生石英+绢云母组合, 孤北古 1 井, 4 124.5 m, 单偏光+正交光+反射光; i. 石英次生加大边内包裹体, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 单偏光包裹体片; j. 石英次生加大边内包裹体放大, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 单偏光包裹体片; k. 石英颗粒微裂缝内包裹体, 孤北古 1 井, 4 123.9 m, 单偏光包裹体片; l. 石英次生加大边内包裹体含子晶, 孤北古 1 井, 4 125.0 m, 单偏光包裹体片

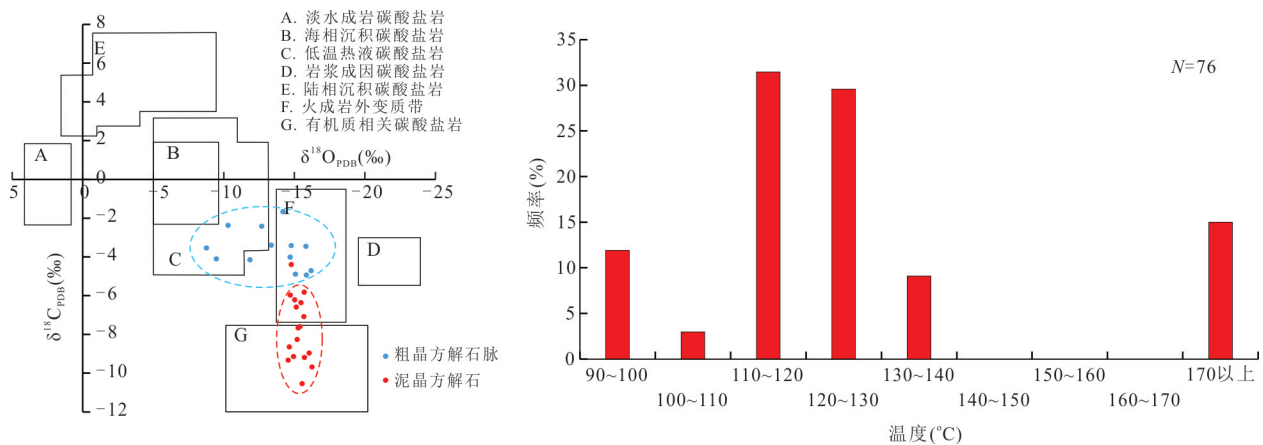


图 6 孤北地区上石盒子组碳氧同位素和包裹体均一温度分布

Fig.6 The distribution of inclusion homogenization temperature and carbon and oxygen isotope of Upper Shihezi Formation of Permian in Gubei buried hill

的溶蚀, 碳酸盐矿物胶结交代和绿泥石沉淀等成为碱性环境下最具特色的成岩现象(邱隆伟等, 2001)。虽然硅质的溶解产生了少量的次生孔隙, 但碳酸盐矿物胶结交代和大量伊利石、绿泥石沉淀使得孔隙度急剧降低, 加之白垩系研究区构造反转, 储层埋

深快速加大, 使得平均孔隙度在此过程中从 19% 降至 6.7%。②济阳拗陷孤北地区石炭二叠煤系烃源岩具有两次生气过程, 第 1 次为中生代末期, 生气量小, 保存条件不利, 对气藏贡献小; 重新埋深后, 东营期进入主生气期, 第 2 次生气量大, 保存条件好,

是孤北煤成气藏的主要油气源(张善文等,2009).伴随着生烃排酸,再埋藏酸性成岩阶段使早先形成的碳酸盐和其他不稳定物质(杂基)发生溶蚀;与此同时,伴随着济阳坳陷第三系强烈的构造活动,研究区二叠系砂岩储层发生脆性断裂,产生裂缝.

5 埋藏—抬升—再埋藏过程对储层的改造

“反演回剥”法是基于储层成岩演化历史的孔隙演化恢复的一种相对定量的方法.此方法通过计算压实作用减孔量,胶结作用减孔量和溶蚀作用增孔量,并结合成岩序列,实现孔隙演化恢复.针对埋藏—抬升—再埋藏过程的孔隙演化恢复,关键点在于甄别3个阶段的主要成岩作用,并且得到对应于埋藏—抬升—再埋藏过程的孔隙度数值节点.综合上文中成岩演化序列以及储层埋藏—抬升—再埋藏的成岩响应两部分内容,可将阶段Ⅰ(大气淡水主导的地层浅埋藏+地层抬升暴露剥蚀阶段)标志成岩作用概括为早期压实作用、长石溶蚀、高岭石胶结和①期石英胶结;将阶段Ⅱ(热液流体主导的火山活动阶段)标志成岩作用概括为①期碳酸盐胶结、②期石英胶结和黄铁矿胶结;阶段Ⅲ(有机酸主导的再埋藏阶段)标志成岩作用概括为②期碳酸盐胶结、碳酸盐溶蚀、晚期长石溶蚀、③期石英胶结以及晚期压实作用.通过具有代表性的3口井102个视域依次进行压实减孔量、不同矿物胶结减孔量、溶蚀增孔量的平均值计算,逐步对埋藏—抬升—再埋藏过程的孔隙演化进行恢复.

5.1 镜下面孔率与实测孔隙度函数关系

“反演回剥”法是以镜下对各类孔隙或自生矿物等圈定后统计的数据为基础,因此代表的是储层二维平面的特征,而孔隙度是岩石三维层面的特

征,二者不完全等同.为实现二者的相互对应,现主要通过多组数据的拟合来建立二者关系.通过对多个铸体薄片孔隙率的统计,结合其所对应的岩心实测孔隙度,可拟合出两者间相互关系为 $\varphi = 0.7818 S_{\text{面}} + 1.6891$ ($R^2 = 0.8604$).这样便可将微观尺度的孔隙面孔率的统计同宏观岩心实测孔隙度数据结合起来,相关系数0.8604,具有较好的相关性,数据可靠.

5.2 压实减孔

$$\varphi_0 = 20.91 + 22.90/S_0, \quad (1)$$

$$S_0 = (d_{75}/d_{25})^{1/2}, \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{压实损失}} = \varphi_0 - (C + \varphi_{\text{残余原生粒间孔}}), \quad (3)$$

式中: φ_0 为原始孔隙度; S_0 为Trask分选系数; d_{25} 为25%处的粒径大小,单位mm; d_{75} 为75%处的粒径大小,单位mm; C 为粒间胶结物含量.压实损失的孔隙度可以通过初始孔隙度与压实后粒间剩余孔隙度做差得出,而压实后粒间剩余孔隙度为粒间胶结物含量与残余原生粒间孔之和.计算可得,济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层经过压实作用孔隙度平均值由40%降低到9.55%,压实减孔量平均值为27.75%.

5.3 储层溶蚀量、胶结量的计算

以镜下观察为主要手段,在其中分别识别并选用不同颜色圈定不同类型的胶结物与溶蚀孔隙区域;然后利用医用图像分析软件Image Pro-plus识别代表不同成岩矿物的颜色类型并计算其面孔率,从而确定储层镜下不同类型的胶结量平均值和溶蚀量平均值;以孤北古2井3690.7m阴极发光照片为例:首先利用CDR临摹工具对不同颜色代表的不同类型胶结物与溶蚀孔隙进行染色,即使用黑色表示石英颗粒,蓝色代表高岭石胶结物,红色和黄色均代表连晶方解石胶结.再使用Image Pro-plus计

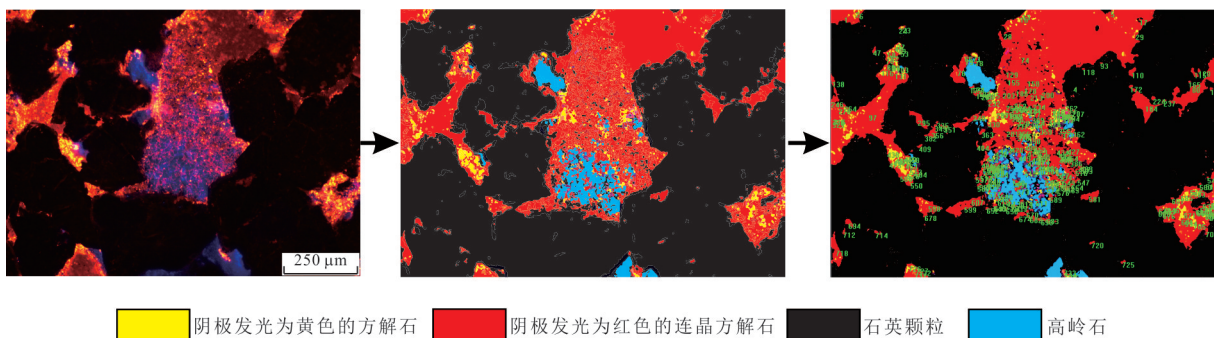


图7 IPP软件使用方法示意图

Fig.7 Schematic diagrams of using IPP software

算不同颜色像素点占整张照片总像素点的比例,即可得到不同类型的胶结物和溶蚀孔的面孔率(图7).这一方法具有以下3点明显优势:①由于使用像素点计算各类成岩作用面孔率,可以有效提高计算精度;②可对含量较低的成岩矿物进行准确计算,如示意图中阴极发光为黄色的连晶方解石;③可以在计算前加入研究人员的地质思维,如前文所述,认为连晶方解石的阴极发光特征为红色到亮黄色,所以笔者进行染色和计算过程中,可以将同一种成岩

矿物(但颜色有差异)进行合并计算,提高计算的准确度.

结合前述的面孔率-孔隙度关系,确定镜下观察到的不同类型的胶结作用和溶蚀作用引起的响应的孔隙度变化量.依据前述之各阶段的划分,计算各阶段成岩矿物产生或颗粒溶蚀导致的孔隙增减量平均值,最后可得到成岩阶段孔隙变量的对应数据列表(表2).从而得到对应各阶段的孔隙度平均值数值节点.

表 2 储层各阶段孔隙变化

Table 2 Different stages and corresponding porosity changes

阶段	主要成岩流体	孔隙变化类型	$\Delta\phi(\%)$	$\phi_1(\%)$	$\phi(\%)$
		原始孔隙度		40	
阶段 I	大气淡水	压实减孔	-26	14	30.16
		溶蚀增孔	16.16	30.16	
阶段 II	火山热液流体	胶结减孔	-11.16	19	19
阶段 III	有机酸	胶结减孔	-12.3	6.7	9.1
		溶蚀增孔	2.4	9.1	
		现今孔隙度		9.1	9.1

注:测试单位:中国石油大学(华东);测试者:王晔磊;测试手段:Leica 偏光显微镜配以 CL8200M K5 阴极发光仪等;条件:室温;误差范围:主要受 IPP 软件圈定时的人为误差,小于 5%.

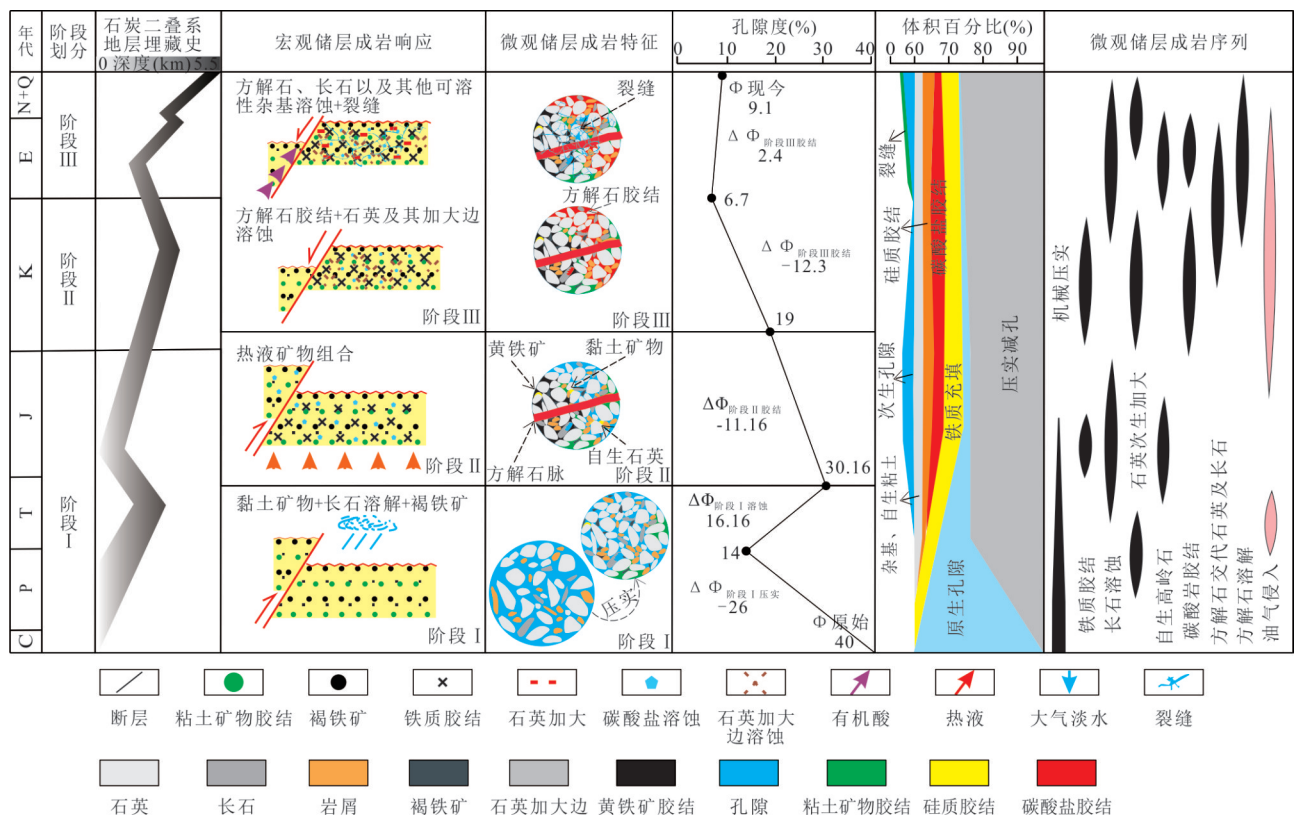


图 8 孤北地区上石盒子组储层埋藏-抬升-再埋藏成岩响应模式

Fig.8 The model of coupling relationship between burial-uplift-reburial diagenesis correspondence

综上,研究区二叠系储层沉积后,阶段Ⅰ储层经历了大规模的抬升运动,使二叠系地层暴露,处于表生成岩环境;阶段Ⅱ由于区域火山活动非常发育,储层经历了一次热液改造,并形成一系列热液矿物;之后阶段Ⅲ在不断埋深过程中,先后经历了碱性到酸性的成岩环境的改造,最终形成现今的储层特征面貌.基于以上认识,建立碎屑岩潜山储层埋藏—抬升—再埋藏过程中的成岩响应模式(图8).

6 结论

(1) 济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组储层砂岩经历了多种类型和多期次的成岩作用,包括压实作用,胶结作用(主要类型为碳酸盐、硅质、黄铁矿和黏土矿物胶结),溶蚀作用(主要类型为石、石英、碳酸盐胶结物和可溶性杂基等物质溶蚀).成岩演化序列为长石溶蚀/高岭石胶结/①期石英胶结→①期碳酸盐胶结/②期石英胶结→②期碳酸盐胶结/石英溶蚀/石英及其加大边溶蚀→碳酸盐溶蚀/晚期长石溶蚀/可溶性杂基溶蚀,伴随成岩作用的加深,蒙脱石伊利石化与压实作用贯穿始终.

(2) 济阳坳陷孤北潜山二叠系上石盒子组砂岩储层先后经历了:大气淡水主导的地层浅埋藏+地层抬升暴露剥蚀阶段(阶段Ⅰ)、热液流体主导的火山活动阶段(阶段Ⅱ)和有机酸主导的再埋藏阶段(阶段Ⅲ).孔隙演化定量恢复结果显示,阶段Ⅰ和Ⅱ压实作用与胶结作用对孔隙度的影响较大,孔隙度从40%降至19%;阶段Ⅲ早期碱性环境下成岩作用对储层为破坏性作用,使储层孔隙度从19%降至6.7%;之后酸性环境下溶蚀改造使储层孔隙度从6.7%升高到9.1%.

References

- Alaa, M. M., Salem, S., Morad, S., 2000. Diagenesis and Reservoir-Quality Evolution of Fluvial Sandstones during Progressive Burial and Uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Reconcavo Basin, Northeastern Brazil. *AAPG Bulletin*, 84:1015–1040. <https://doi.org/10.1306/a9673b9e-1738-11d7-8645000102c1865d>
- Bai, Q.L., 2003. Gas Reservoir Forming Model Analysis of Permo-Carboniferous Coal-Derived Gas in Jiyang Depression. *Oil & Gas Recovery Technology*, 10(5): 28–30, 7(in Chinese with English abstract).
- Cao, Z.H., Zhang, H.C., Liu, G.Y., et al., 2015. Main Control Factors and Distribution Prediction of High-Quality Carbonate Reservoirs in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(1): 103–110(in Chinese with English abstract).
- Chang, G.Z., Bi, C.Q., Lin, H.M., 2002. Reverse Tectonic Evolution, Reservoir-Forming System and Exploration of Low Buried-Hill—Taking Gubei Low Buried-Hill, Shengli Oilfield as an Example. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 9(5): 19–23, 90(in Chinese with English abstract).
- Chen, X.H., 2013. Study on Negative Inversion Structure and Reservoir-Forming Characteristics of Gulow Buried Hill in North China. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 10(10): 12–14, 20(in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.S., Chen, S.Y., Yan, J.H., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Control Factors of Upper Palaeozoic in Dagang Exploration Area. *Earth Science*, 42(11): 2055–2068, 2104(in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.S., Zhou, L.H., Jin, F.M., et al., 2021. Hydrothermal Fluid Activity and Its Reformation on Reservoirs in Qikou Depression. *Earth Science*, 46(1): 200–214(in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Song, G.Q., Wang, L., 2009. Generation Models of Carboniferous-Permian Coal-Derived Gas in Shengli Oilfield. *Petroleum Exploration and Development*, 36(3): 358–364(in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Yang, K., Wan, C.L., 2011. Geochemical Characteristic of Intrusion Rocks in Coal-Series Hydrocarbon Source Rock of Carboniferous-Permian under Jiyang Depression. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(2): 111–116(in Chinese with English abstract).
- Li, P.W., He, Z.L., Luo, P., et al., 2020. Characteristics of and Main Factors Controlling the Dolomite Reservoir of Gaoyuzhuang-Wumishan Formations in the Jixian System, the North of North China. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 26–36, 49(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.B., Li, J., Cui, J.F., et al., 2020. The Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of the Mesozoic Clastic Reservoirs in Buried Hill, Beidagang, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(1): 13–25(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Cao, Z.X., Wang, M.Z., et al., 2004. Distribution and Burying Characteristics of the Permo-Carboniferous System and the Coal-Formed Gas Source Rock in Jiyang Depression. *Coal Geology & Exploration*, 32(4): 4–6(in Chinese with English abstract).
- Liao, J.H., Wu, K.Q., Er, C., 2022. Deep Reservoir Char-

- acteristics and Effective Reservoir Control Factors in Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2454–2467(in Chinese with English abstract).
- Liu, C., 2017. Conquer Buried Hill. *China State-Owned Enterprise Management*, (S7): 74–77(in Chinese).
- Liu, X.H., Li, N.X., Feng, M.Y., et al., 2019. Fracture Fillings and Alteration Halo in Volcanic Reservoirs as Indicator of Fluid Activities in the Dixi Area in the Kelameili Gas Field, Junggar Basin, Northwestern China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(3): 539–548(in Chinese with English abstract).
- Lu, H., Wang, Q.B., Niu, C.M., et al., 2020. Meteoric Leaching Evidences, Diagenetic Model and Its Geology Significance in Mixed Rock of Steep Slope Zone of Shijiuuo Uplift. *Earth Science*, 45(10): 3721–3730(in Chinese with English abstract).
- Meng, F.C., Zhou, L.H., Wei, J.Y., et al., 2021. Characteristics and Formation Mechanism of Mesozoic Volcanic Reservoirs from Buried Hills in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 52(3): 859–875(in Chinese with English abstract).
- Molenaar, N., Cyziene, J., Sliupa, S., et al., 2008. Lack of Inhibiting Effect of Oil Emplacement on Quartz Cementation: Evidence from Cambrian Reservoir Sandstones, Paleozoic Baltic Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 120(9/10): 1280–1295. <https://doi.org/10.1130/b25979.1>
- Pang, X.J., Du, X.F., Wang, G.M., et al., 2022. Genetic Mechanism and Pore Evolution of High-Quality Glutenite Reservoirs of the Deep Kongdian Formation in Southwestern, BZ19-6, Bohai Sea. *Earth Science* (in Press) (in Chinese with English abstract).
- Peng, C.S., 2005. The Pool-Forming Condition and Character of Coal-Formed Gas in Gubei Deeply Buried Hill of Jiyang Depression. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 35(4): 670–676(in Chinese with English abstract).
- Qin, X.L., Li, R.X., Xi, S.L., et al., 2017. Hydrothermal Alteration and Its Influence on Quality of the Upper Paleozoic Gas Reservoirs in Eastern Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(1): 43–51(in Chinese with English abstract).
- Qiu, L.W., Jiang, Z.X., Cao, Y.C., et al., 2001. Alkaline Diagenesis in Biyang Depression and Its Influence on Reservoir. *Science in China (Ser. D)*, 31(9): 752–759 (in Chinese).
- Qiu, L.W., Xu, N.N., Zhou, Y.Y., et al., 2015. Dissolution of Quartz in Tight Sandstones of the Daniudi Area, Ordos Basin, and Its Influence to High Quality Reservoirs. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 38–44, 2(in Chinese with English abstract).
- Song, B.R., Hu, Y.J., Bian, S.Z., et al., 2011. Reservoir Characteristics of the Crystal Basement in the Xinglongtai Buried-Hill, Liaohe Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 77–82(in Chinese with English abstract).
- Wan, C.L., Li, J.Y., Jin, Q., et al., 2011. Magma Intrusion and Its Effects on Enrichment of Shale Gas in Fault Subsidence Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(6): 1088–1092(in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Sun, Q.L., Xie, X.N., et al., 2022. Characteristics and Mechanisms of Shallow Igneous Intrusions and Their Implications on Hydrocarbon Geology in the Baiyun Sag. *Earth Science*, 47(2): 505–517(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.H., Xia, B., Chen, G.W., et al., 2004. Characteristics of Jiyang Depression and Mechanism of Basin Formation. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(4): 428–434 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.L., Qiu, L.W., Shi, Z., et al., 2016. Study on Karst Development Pattern Based on FMI Logging Facies: A Case Study of Paleozoic Strata in Nanpu Sag of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 37(3): 301–306(in Chinese with English abstract).
- Yang, C., Chen, Q.H., 2005. Tectonic Evolution and Tectono-Stratigraphic Classification of Jiyang Depression. *Oil & Gas Recovery Technology*, 12(2): 9–12, 22 (in Chinese with English abstract).
- Yao, H.P., 2015. Effective Source Rock of Permian-Carboniferous Coal Measure Taiyuan Formation in Jiyang Depression. *Shanxi Coal*, 35(2): 4–7(in Chinese with English abstract).
- Yuan, G.H., Cao, Y.C., Yang, T., et al., 2013. Porosity Enhancement Potential through Mineral Dissolution by Organic Acids in the Diagenetic Process of Clastic Reservoir. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 207–219(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.W., Zhang, L.Y., Li, Z., 2009. Analysis of Accumulation Process of Coal-Formed Gas in Gubei Buried Hill of Jiyang Depression. *Natural Gas Geoscience*, 20(5): 670–677(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.L., 2018. Pyrite-Sericite-Quartz Alteration and Gold Mineralization Mechanism of the Dayingezhuang-Xiadian Gold-Field, Jiaodong Peninsula, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing.
- Zhang, D.Z., Chu, L.L., Zhou, X., et al., 2021. Diagenesis

and Diagenesis Facies of Tight Gas Reservoir of Shahezi Formation, in Xujiaweizi Fault Depression of North Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(1): 22–34 (in Chinese with English abstract).

Zhao, R., 2016. Tectonic Evolution and Gold Mineralization in the Jiaodong Peninsula (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing.

附中文参考文献

白群丽, 2003. 济阳拗陷石炭—二叠系煤成气成藏模式分析. *油气地质与采收率*, 10(5): 28–30, 7.

曹中宏, 张红臣, 刘国勇, 等, 2015. 南堡凹陷碳酸盐岩优质储层发育主控因素与分布预测. *石油与天然气地质*, 36(1): 103–110.

常国贞, 毕彩芹, 林红梅, 2002. 低潜山反转构造演化、成藏体系与勘探: 以胜利油区孤北低潜山为例. *断块油气田*, 9(5): 19–23, 90.

陈旭辉, 2013. 孤北低潜山负反转构造及成藏特征研究. *长江大学学报(自科版)*, 10(10): 12–14, 20.

侯中帅, 陈世悦, 鄢继华, 等, 2017. 大港探区上古生界沉积特征与控制因素. *地球科学*, 42(11): 2055–2068, 2104.

侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等, 2021. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造. *地球科学*, 46(1): 200–214.

金强, 宋国奇, 王力, 2009. 胜利油田石炭—二叠系煤成气生成模式. *石油勘探与开发*, 36(3): 358–364.

金强, 杨恺, 万丛礼, 2011. 济阳拗陷下伏石炭系—二叠系煤系烃源岩中侵入岩的地球化学特征. *地球科学与环境学报*, 33(2): 111–116.

李朋威, 何治亮, 罗平, 等, 2020. 华北北部地区蓟县系高于庄组—雾迷山组白云岩储层特征与形成主控因素. *石油与天然气地质*, 41(1): 26–36, 49.

李增学, 曹忠祥, 王明镇, 等, 2004. 济阳拗陷石炭—二叠系埋藏条件及煤型气源岩分布特征. *煤田地质与勘探*, 32(4): 4–6.

李祖兵, 李剑, 崔俊峰, 等, 2020. 渤海湾盆地北大港潜山中生界碎屑岩储层特征及发育主控因素. *天然气地球科学*, 31(1): 13–25.

廖计华, 吴克强, 耳闯, 2022. 珠江口盆地白云凹陷深层储层特征与有效储层控制因素. *地球科学*, 47(7): 2454–2467.

刘畅, 2017. 征服古潜山. *国企管理*, (增刊7): 74–77.

刘小洪, 李宁辛, 冯明友, 等, 2019. 裂缝充填矿物和蚀变晕对火山岩储集层流体作用的指示: 以克拉美丽气田滴西地区为例. *矿物岩石地球化学通报*, 38(3): 539–548.

卢欢, 王清斌, 牛成民, 等, 2020. 湖相混积岩系同沉积淋滤

作用识别标志与优质储层形成机理: 以石臼坨凸起陡坡带 Q29 和 Q36 构造沙一、二段为例. *地球科学*, 45(10): 3721–3730.

孟凡超, 周立宏, 魏嘉怡, 等, 2021. 渤海湾盆地黄骅拗陷潜山中生界火山岩储层特征及成储机制. *中南大学学报(自然科学版)*, 52(3): 859–875.

庞小军, 杜晓峰, 王冠民, 等, 2022. 渤海海域渤中 19-6 构造及围区深层孔店组砂砾岩优质储层成因及孔隙演化. *地球科学*.

彭传圣, 2005. 济阳拗陷孤北低潜山煤成气成藏条件及特征. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 35(4): 670–676.

覃小丽, 李荣西, 席胜利, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地东部上古生界储层热液蚀变作用. *天然气地球科学*, 28(1): 43–51.

邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等, 2001. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 31(9): 752–759.

邱隆伟, 徐宁宁, 周涌沂, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩石英溶解作用及其对优质储集层的影响. *矿物岩石地球化学通报*, 34(1): 38–44, 2.

宋柏荣, 胡英杰, 边少之, 等, 2011. 辽河拗陷兴隆台潜山结晶基岩油气储层特征. *石油学报*, 32(1): 77–82.

万丛礼, 李钜源, 金强, 等, 2011. 断陷盆地岩浆侵入对页岩气的富集作用. *天然气地球科学*, 22(6): 1088–1092.

望畅, 孙启良, 解习农, 等, 2022. 白云凹陷浅成岩浆侵入体发育特征、成因及油气地质意义. *地球科学*, 47(2): 505–517.

王世虎, 夏斌, 陈根文, 等, 2004. 济阳拗陷构造特征及形成机制讨论. *大地构造与成矿学*, 28(4): 428–434.

王晔磊, 邱隆伟, 师政, 等, 2016. 基于 FMI 测井相的岩溶发育模式: 以渤海湾盆地黄骅拗陷南堡凹陷古生界为例. *新疆石油地质*, 37(3): 301–306.

杨超, 陈清华, 2005. 济阳拗陷构造演化及其构造层的划分. *油气地质与采收率*, 12(2): 9–12, 22.

姚海鹏, 2015. 济阳拗陷石炭—二叠系太原组有效烃源岩分析. *山西煤炭*, 35(2): 4–7.

远光辉, 操应长, 杨田, 等, 2013. 论碎屑岩储层成岩过程中有机酸的溶蚀增孔能力. *地学前缘*, 20(5): 207–219.

张炳林, 2018. 胶东大尹格庄—夏甸金矿田黄铁绢英岩化蚀变与金成矿机理(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.

张善文, 张林晔, 李政, 2009. 济阳拗陷孤北潜山煤成气成藏过程分析. *天然气地球科学*, 20(5): 670–677.

张大智, 初丽兰, 周翔, 等, 2021. 松辽盆地北部徐家围子断陷沙河子组致密气储层成岩作用与成岩相特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 51(1): 22–34.

赵睿, 2016. 胶东半岛构造演化及金成矿作用(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.