

文章编号: 1000-0747(2019)01-0039-13 DOI: 10.11698/PED.2019.01.04

中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义

汪泽成¹, 刘静江¹, 姜华¹, 黄士鹏¹, 王坤¹, 徐政语²,
江青春¹, 石书缘¹, 任梦怡¹, 王天宇¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310013)

基金项目: 国家科技重大专项“下古生界—前寒武系碳酸盐岩油气成藏规律、关键技术及目标评价”(2016ZX05004-001);
国家重点研发计划“中新元古界微生物碳酸盐岩沉积环境与成储机制”(2017YFC0603103)

摘要:近年来四川盆地及邻区震旦系灯影组天然气及陡山沱组页岩气勘探均取得重大突破,但对陡山沱组的沉积背景条件缺乏系统研究。利用大量露头资料,结合少量钻井、地震资料,分析了中—上扬子地区陡山沱组沉积期岩相古地理格局、沉积环境、沉积演化及烃源岩分布。研究表明:①中—上扬子地区陡山沱组沉积期沉积充填序列及地层分布受古隆起和边缘凹陷控制。古隆起区陡山沱组超覆沉积,厚度薄,发育滨岸相、混积陆棚相、非典型碳酸盐台地相;边缘凹陷地层齐全、厚度大,发育深水陆棚相和局限海盆相。②陡山沱组沉积序列总体表现为“海侵—高位—海退”的一个完整沉积旋回。陡山沱组一段为海侵初期的非典型碳酸盐缓坡沉积,陡山沱组二段为广泛海侵期的滨岸—混积陆棚沉积,陡山沱组三段为海侵高位阶段的非典型局限—开阔海台地沉积。③陡山沱组二段发育富有机质黑色页岩,分布稳定、厚度大,是重要的烃源岩发育层段和页岩气主力层段;陡山沱组三段以微生物碳酸盐岩为特征,有较好的储集条件,有利于天然气及磷等矿产资源成藏(矿)富集,为值得重视的新领域。秦岭海槽、鄂西海槽是天然气(包括页岩气)及磷矿、锰矿等矿产资源勘查的有利区。图10表2参29

关键词:震旦系;陡山沱组;岩相古地理;四川盆地;古隆起;边缘凹陷;碳酸盐台地;黑色页岩;烃源岩

中图分类号: P531

文献标识码: A

Lithofacies paleogeography and exploration significance of Sinian Doushantuo depositional stage in the middle-upper Yangtze region, Sichuan Basin, SW China

WANG Zecheng¹, LIU Jingjiang¹, JIANG Hua¹, HUANG Shipeng¹, WANG Kun¹, XU Zhengyu²,
JIANG Qingchun¹, SHI Shuyuan¹, REN Mengyi¹, WANG Tianyu¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083;
2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Petroleum, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In recent years, natural gas exploration in the Sinian Dengying Formation and shale gas exploration in Doushantuo Formation have made major breakthroughs in the Sichuan Basin and its adjacent areas. However, the sedimentary background of the Doushantuo Formation hasn't been studied systematically. The sedimentary paleogeographic pattern, sedimentary environment, sedimentary evolution and distribution of source rocks during the depositional stage of Doushantuo Formation were systematically analyzed by using a large amount of outcrop data, and a small amount of drilling and seismic data. (1) The sedimentary sequence and stratigraphic distribution of the Sinian Doushantuo Formation in the middle-upper Yangtze region were controlled by paleo-uplifts and marginal sags. The Doushantuo Formation in the paleouplift region was overlaid with thin thickness, including shore facies, mixed continental shelf facies and atypical carbonate platform facies. The marginal sag had complete strata and large thickness, and developed deep water shelf facies and restricted basin facies. (2) The Doushantuo Formation is divided into four members from bottom to top, and the sedimentary sequence is a complete sedimentary cycle of transgression-high position-regression. The first member is atypical carbonate gentle slope deposit in the early stage of the transgression, the second member is shore-mixed shelf deposit in the extensive transgression period, and the third member is atypical restricted-open sea platform deposit of the high position of the transgression. (3) The second member has organic-rich black shale developed with stable distribution and large thickness, which is an important source rock interval and major shale gas interval. The third member is characterized by microbial carbonate rock and has good storage conditions which is conducive to the accumulation of natural gas, phosphate and other mineral resources, so it is a new area worthy of attention. The Qinling trough and western Hubei trough are favorable areas for exploration of natural gas (including shale gas) and mineral resources such as phosphate and manganese ore.

Key words: Sinian; Doushantuo Formation; lithofacies paleogeography; Sichuan Basin; paleo-uplift; marginal sag; carbonate platform; black shale; source rock

引用：汪泽成，刘静江，姜华，等. 中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 39-51.

WANG Zecheng, LIU Jingjiang, JIANG Hua, et al. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Sinian Doushantuo depositional stage in the middle-upper Yangtze region, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 39-51.

0 引言

中国南方震旦系分布广泛，蕴藏着丰富的常规天然气和页岩气资源。2012 年以来，在四川盆地高石梯—磨溪地区，发现了安岳特大型气田，震旦系灯影组为其主力含气层系之一^[1-2]；在湖北宜昌地区，震旦系陡山沱组页岩气勘探获重要发现^[3]。陡山沱组是中—上扬子地区进入稳定克拉通拗陷阶段的第 1 套沉积，以岩相古地理为重点的油气地质条件研究缺乏系统性，制约了该层系天然气资源潜力的客观评价及有利勘探区优选。

中—上扬子地区震旦系陡山沱组的研究可追溯到 20 世纪 20 年代。1924 年李四光、赵亚曾在此建立了震旦纪地层剖面，包括南沱组、陡山沱岩系和灯影组 3 个岩石地层单位^[4]。其后的数十年，震旦系研究取得重要成果。前人的研究主要侧重于地层学^[5-12]、生物学^[13]以及新元古代埃迪卡拉（震旦）纪重大生命事件对地球早期生命演化的科学意义，少有对其岩相古地理方面的研究。2012 年以来，随着震旦系常规天然气的发现及海相页岩气勘探的快速发展，陡山沱组逐渐成为研究热点^[14-16]。为了深入研究陡山沱组岩相古地理特征，研究团队考察了川、渝、滇、黔、陕及湘鄂西数十条震旦系露头剖面，收集整理钻井、测井、地震和其他综合研究资料，开展中—上扬子地区陡山沱组对比、沉积相分析等基础工作，编制了陡山沱组一段、二段和三段（后文简称陡一段、陡二段和陡三段）的

岩相古地理图，同时开展露头区烃源岩实验分析，结合沉积相分析，确定烃源岩分布有利区，为评价陡山沱组天然气勘探潜力提供理论依据。

1 陡山沱组地层特征与分布

中—上扬子地区震旦系陡山沱组分布广泛，不同地层分区有不同组名^[5-12]。上扬子东部及中扬子地区称之为陡山沱组，滇东地区为王家湾组，滇北—川西地区为观音崖组，川南—川北—陕南地区为喇叭岗组。

1.1 地层特征

陡山沱组层型剖面位于湖北宜昌莲沱镇西面之陡山沱^[9]，岩性主要为灰、灰黑色泥质白云岩、白云质灰岩及黑色泥页岩，常夹硅磷质结核和团块，含微古植物、宏观藻类，与下伏南华系南沱组灰绿色冰碛岩不整合接触，自下而上可分 4 段（见图 1）：陡一段仅分布于鄂西及黔北小部分地区，岩性为灰色白云岩，称盖帽白云岩。陡二段除古陆顶部缺失外，大部分地区均有沉积；岩性变化大，在鄂西、川北及黔北等地区主要为黑色页岩、泥岩夹灰色泥质白云岩、白云岩，在川西地区为灰白色、紫红色页岩夹少量灰色泥岩及白云岩。陡三段分布范围与陡二段相当，但比陡二段分布范围略大；岩性为灰色白云岩、白云质灰岩及条带状灰岩。陡四段分布范围同陡三段，由于遭受剥蚀，多数地区存在地层缺失；鄂西地区陡四段岩性为黑色页岩夹少量泥灰岩和灰岩。

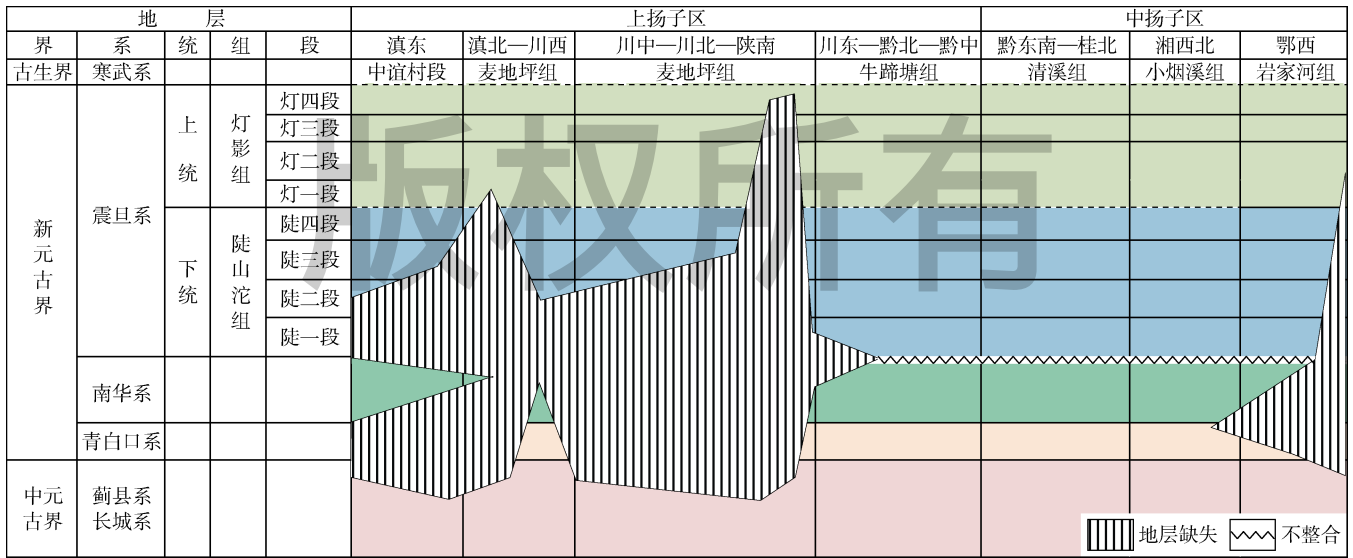


图 1 中—上扬子地区中—新元古界的地层分布表（不同颜色代表不同的层系）

与陡山沱组时代相当的地层，在川中、川南地区，称之为喇叭岗组，岩性为砂岩、含砾砂岩、页岩夹白云岩或白云质灰岩，局部地区发育膏盐岩夹层；川西北称为胡家寨组，为一套巨厚的板岩、千枚岩化泥页岩、炭质页岩夹砂岩沉积；川西、滇中称观音崖组，下部为紫红色砂泥岩，上部夹碳酸盐岩，云南华坪、盐边地区夹膏盐岩，含叠层石；滇东昆明—建水一带称王家湾组，为海湾潟湖相紫红色砂页岩夹白云岩、泥质灰岩；黔中开阳、福泉、麻江一带称洋水组，一般厚度为 10~50 m，主要为灰绿色砂岩、粉砂岩及细砾岩，顶部为砂质白云岩及磷块岩，含硅质叠层石；

在遵义松林，陡山沱组岩性为一套灰黑色含磷页岩夹硅质岩、薄层白云岩沉积。

1.2 地层分布

利用露头、钻井资料，结合少量地震资料，编制四川盆地及邻区陡山沱组厚度分布图（见图 2），揭示陡山沱组分布具有“在四川盆地内部厚度薄、盆地边缘厚度大”的特征。四川盆地大部分地区缺失陡一段、陡二段及陡三段的部分地层，残留地层厚度一般为 20~60 m。四川盆地外围陡山沱组厚度较大，一般为 120~480 m。鄂西地区陡山沱组发育较全，可以划分为 4 个岩性段。往东向淮阳古陆地层厚度具有超覆变薄的特

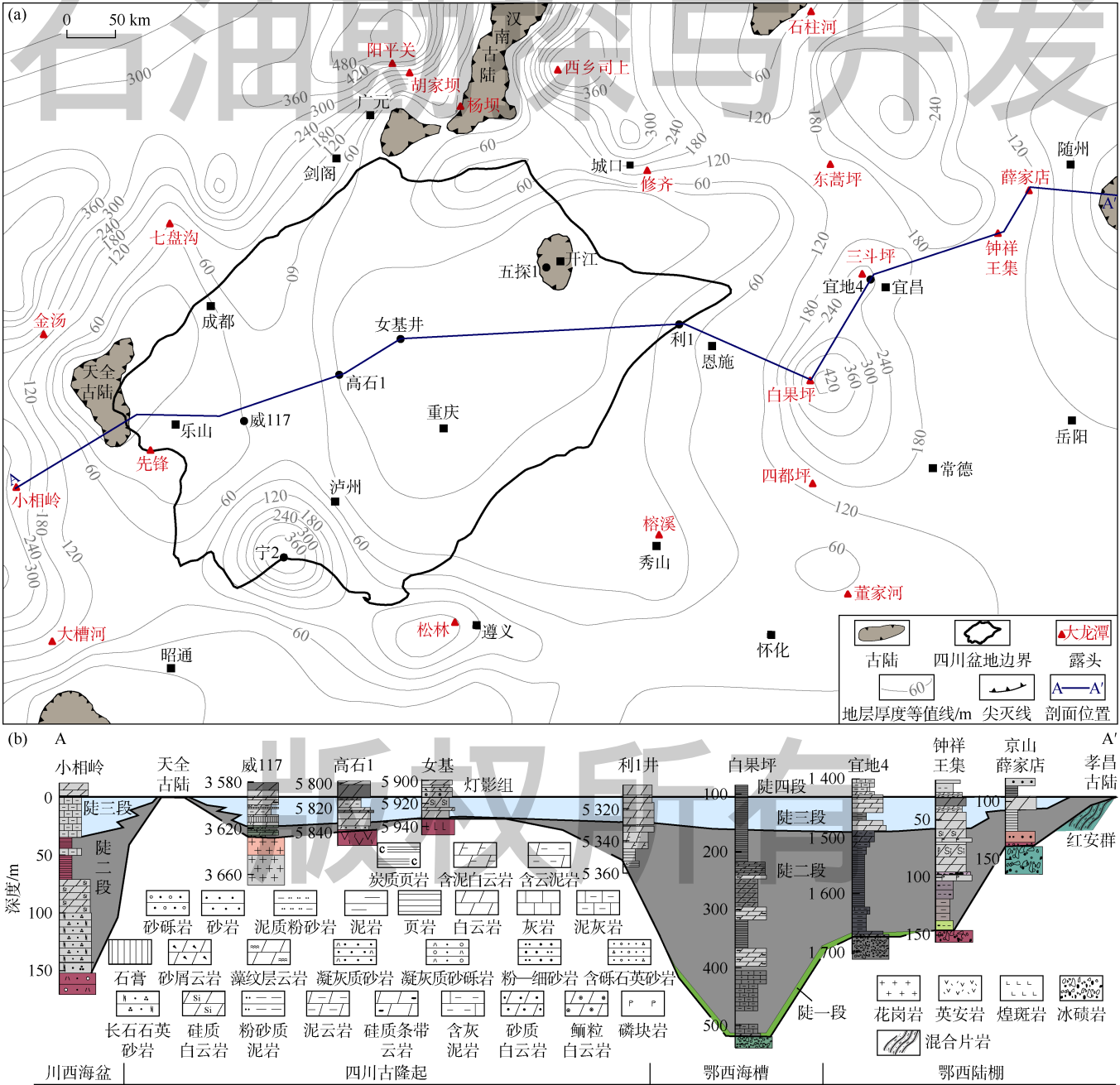


图 2 中—上扬子地区陡山沱组残留地层厚度等值线图 (a) 及对剖剖面图 (b)

征,在孝昌地区灯影组直接覆盖在红安群灰绿色混合片岩之上。此外,汉南古陆、开江古陆和天全古陆陡山沱组缺失(见图3),灯影组直接超覆在前震旦系上。

陡山沱组各层段分布及与下伏地层接触关系见图3。陡一段仅分布于湘鄂西及大巴山—秦岭地区;四川

盆地大部分缺失陡二段,仅有陡三段沉积。在接触关系方面,湘鄂西、大巴山—秦岭地区陡一段与下伏南沱组冰碛岩不整合接触;在四川盆地外围陡一段缺失区陡二段直接与南沱组不整合接触;在四川盆地主体部分,陡三段直接与中元古界不整合接触。

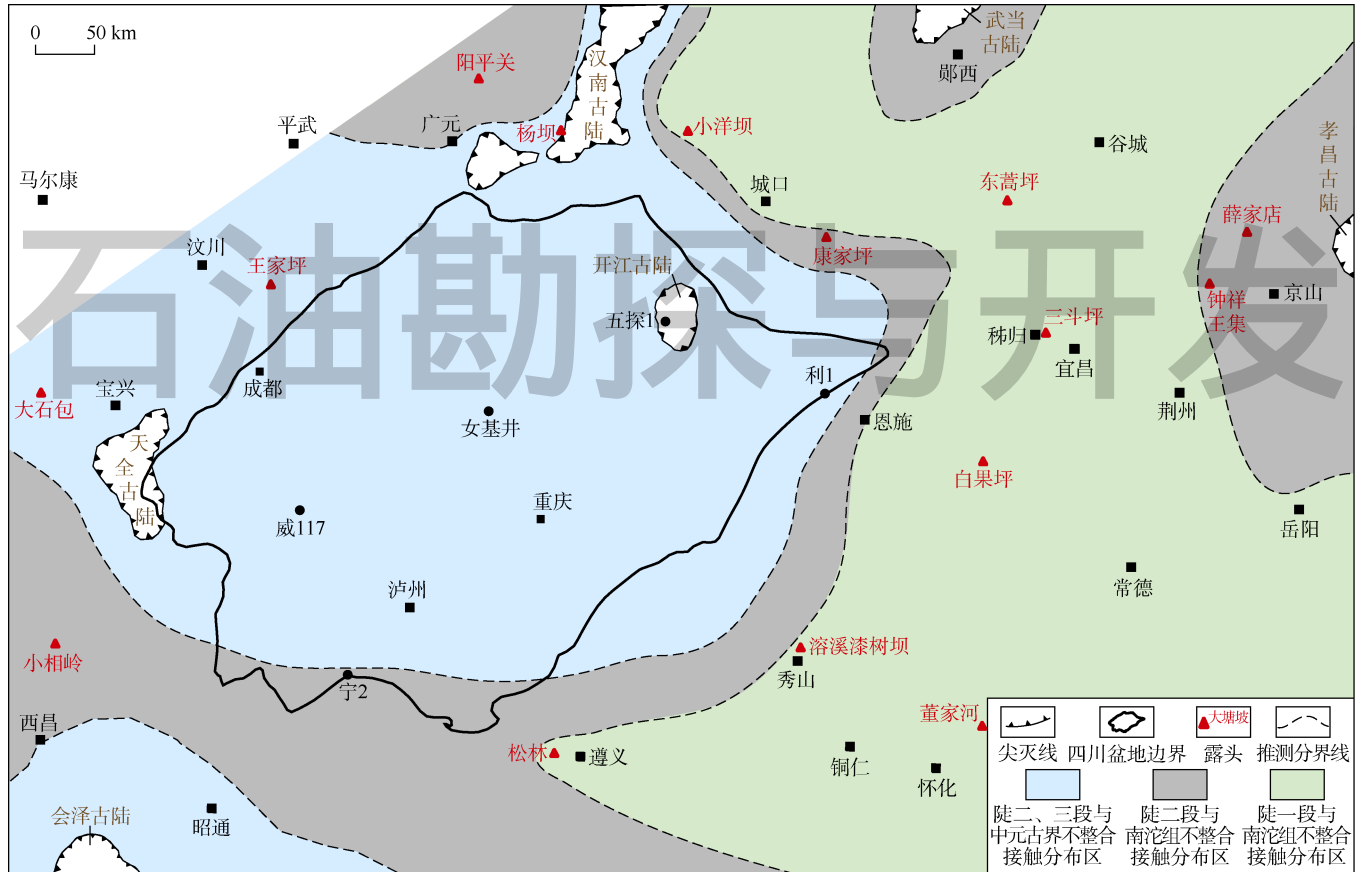


图3 中—上扬子地区陡山沱组与下伏地层接触关系分区图

2 陡山沱组沉积期古构造格局

陡山沱组沉积期沉积古构造格局由古隆起和边缘凹陷组成。

2.1 古隆起形成与分布

陡山沱组沉积前中—上扬子地区发育3大古隆起:四川古隆起、淮阳古隆起和滇黔古隆起^[17-18]。其中,四川古隆起范围包括了现今的四川盆地及其周缘,其陡山沱组薄、下部地层缺失,由边缘凹陷向隆起区超覆沉积。

四川古隆起面积约 $40 \times 10^4 \text{ km}^2$ (见图2、图3)。米仓山地区和峨眉山以西地区有前震旦系出露,分别为火地垭群和峨边群^[19]。米仓山地区的火地垭群下部岩性为一套浅变质碎屑岩夹大理岩,含叠层石,称麻窝子组,厚度约为3500m;上部岩性主要为一套变质碎屑岩,夹大理岩和火山岩,称上两组,厚度超过1700

m。侵位于该群的钠长黑云千片岩(原岩为中酸性火山岩)锆石铅同位素年龄为 $1\ 619.3 \text{ Ma}$ ^[19],橄榄角闪辉石岩同位素年龄为 $1\ 065 \text{ Ma}$ (K-Ar),石英闪长岩为 956 Ma (U-Pb)^[20],时代属于中元古代。南江杨坝剖面可见陡山沱组四段直接与火地垭群上两组不整合接触,缺失陡一段—陡三段(见图4)。四川盆地西部的峨边群岩性主要为一套灰白色大理岩夹浅变质海相碎屑岩,夹基性—酸性岩火成岩,厚度为6800m,时代属于中元古代^[19]。

四川古隆起可能形成于青白口纪中—晚期至南华纪早期,发生于该时期的大规模构造热事件导致了四川古隆起的形成。火地垭群、峨边群含有基性—酸性侵入岩体,其中的辉绿岩锆石年龄为 $813.4 \pm 8.2 \text{ Ma}$ ^[21],花岗岩年龄在750~840 Ma^[22]。凌文黎等^[23]认为在新元古代早期(距今约 $860 \pm 12 \text{ Ma}$)火地垭群受到了构造热事件的改造,与区域上广泛分布的基性—超基性



图 4 南江杨坝剖面陡山沱组沉积期剖面

和碱性、中—酸性岩浆活动时间一致，川西地区发生大规模裂谷岩浆活动是新元古代中期与超大陆裂解有关的超级地幔柱作用导致的。四川盆地腹部的威 117 井、高石 1 井和女基井钻遇黄灰色花岗岩（距今 794±11 Ma）和紫红色英安岩。Li 等人^[24]认为超级地幔柱的形成有两个阶段，分别为距今 795~830 Ma 和距今 745~780 Ma，广泛分布于中—上扬子地区中新元古界的火山岩侵入岩体可能是 Rodinia 超大陆在距今 795~830 Ma 期间裂解产生的岩浆侵位而成。青白口纪中—晚期超级地幔柱活动导致了上扬子地区大规模构造隆升，中—新元古界暴露剥蚀，以至于古陆之上大面积缺失青白口纪—南华纪地层沉积。

四川古隆起对陡山沱组沉积的控制作用很明显，古隆起整体缺失陡山沱组陡一段，大部分地区仅存在陡山沱组中—上部，厚度仅 20~60 m，远小于周缘凹陷地层厚度。

位于中扬子北部的淮阳古隆起，主体位于大别山地区，又称之为大别古陆^[25]。该古隆起主要由前震旦系变质岩系组成，在湖北北部包括了随县群（距今 668.00~1 228.03 Ma）和大别群。在圻州地区随县群与上覆陡山沱组陡二段不整合接触；在孝昌县以东地区为大别群灰绿色片岩与上覆陡二段不整合接触（称孝昌古陆）。

2.2 边缘凹陷形成与分布

陡山沱组沉积期上扬子克拉通西部边缘发育典型的大陆裂谷—攀西裂谷^[24,26]。攀西裂谷活动的记录最早可以追溯到中元古代，并在新元古代有多次活动期和间歇期^[26]。受攀西裂谷活动影响，自北向南分别发育有宁强、清平、康定、西昌、攀枝花等多个边缘凹陷^[17-18]，沉积厚度为千米左右，局部厚度超过 1 800 m。

四川古隆起北缘发育城口凹陷，陡山沱组黑色岩系沉积厚度可达 1 840 m。城口凹陷可能是华北板块与扬子板块拼合过程中残存的小型残留洋盆。1992 年，

赵东旭在城口陡山沱组沉积中发现锰质叠层石^[27], 或为锰结核, 可能与现今大洋锰结核成因相似。

四川古隆起东缘发育鹤峰凹陷, 属于四川古隆起和淮阳古隆起之间的低洼地带, 是陡山沱组沉积期鄂西海槽的沉积中心, 沉积了巨厚的黑色页岩夹硅质岩和碳酸盐岩。鄂西海槽是上扬子与中扬子之间相对低洼的窄长地带, 近南北向展布, 向北沟通扬子克拉通北面的秦岭海槽, 向南连通湘桂海盆。

四川古隆起南缘发育长宁凹陷, 夹持在四川古隆起与黔中古隆起之间, 西侧有天全古陆的遮挡, 形成一个半封闭—封闭的海湾, 陡山沱组沉积中—晚期发育膏盐岩。

3 沉积特征与岩相古地理

3.1 典型剖面沉积特征

本文重点介绍川北杨坝剖面、川中威 117 井剖面和鄂西宜地 4 井陡山沱组沉积特征。

3.1.1 南江县杨坝剖面

剖面位于四川盆地北部南江县杨坝镇, 构造上位于汉南古陆西斜坡上部(见图 2)。地层出露下震旦统喇叭岗组 and 上震旦统灯影组, 灯影组厚度为 836 m, 喇叭岗组厚度为 53 m, 喇叭岗组与陡山沱组为同期异相沉积(见图 4)。剖面可见陡山沱组缺失陡一段—陡三段(部分), 仅有陡四段, 与下伏火地垭群上两组黄灰砂质板岩不整合接触, 顶部黄灰色中—厚层细砂岩与上覆灯影组灰白色白云岩不整合接触(见图 4)。

陡山沱组主要为碎屑滨岸—潟湖相砂泥岩沉积。底部为中层状白云质含砾砂, 为前滨滩坝沉积; 中—下部为浅灰色、灰色薄层泥岩, 局部含少量粉砂岩, 为近岸潟湖沉积; 上部为灰色、灰绿色中—厚层夹薄层粉—细砂岩、石英砂岩夹泥质粉砂岩, 具楔状层理、交错层理、平行层理和斜层理, 为前滨—临滨滩坝沉积。

3.1.2 威 117 井

威 117 井位于四川盆地威远构造带, 井深 3 746 m, 钻穿震旦系至基底花岗岩。震旦系灯影组钻厚 598 m, 陡山沱组钻厚 41 m。震旦系全井段取心, 陡山沱组沉积现象明显(见图 5), 上部为灰白色粉晶云岩、浅褐色泥晶云岩夹含泥云岩, 局部见藻纹层; 中部为含石膏泥质云岩夹石膏层, 白色石膏层为主夹薄层膏云岩; 下部为灰绿色砂质云岩、灰绿色云质泥岩夹灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩、含砾砂岩, 可见波痕层理。总体为半局限—局限台地相沉积, 以发育藻云坪—蒸发潟湖为主要特征。区域对比为陡二段和陡三段, 缺失陡一段和陡四段。

3.1.3 宜地 4 井

宜地 4 井位于宜昌秭归附近, 是一口以陡山沱组页岩气为勘探对象的探井, 井底层位为南沱组。该井震旦系全取心, 陡山沱组可分 4 段(见图 6), 陡一段为浅灰色条带状含泥白云岩, 浅色条带云质较重, 深色条带泥质较重, 为浅水陆棚沉积。陡二段底部为深灰色泥岩、灰质泥岩夹灰色泥灰岩, 中—上部为褐灰色夹灰色、深灰色页岩, 局部含磷质结核, 为深水陆棚沉积。陡三段下部为灰色条带状泥质白云岩夹薄层白云岩, 为浅水陆棚沉积; 中部夹灰色砂屑白云岩, 上部为浅灰色条带状泥晶白云岩, 为浅水陆棚及碎屑流沉积。陡四段下部为黑色泥岩夹薄层泥质灰岩或云岩, 为深水陆棚沉积; 中—上部为浅灰色条带状含泥白云岩夹泥晶白云岩, 顶部为灰色、浅灰色云质泥岩或泥云岩, 为浅水陆棚沉积。陡山沱组与下伏南沱组冰碛岩不整合接触, 与上覆灯影组整合接触。

3.2 岩相古地理及其演化

中—上扬子地区陡山沱组主要有碎屑滨岸沉积、碳酸盐台地沉积、陆棚和局限海盆沉积, 可划分为 3 大沉积体系、6 大沉积相、18 个亚相、若干微相(见表 1)。碎屑岩沉积主要发育在陡二段和陡四段, 碳酸盐岩沉积主要发育在陡一段和陡三段。陡一段—陡二段为海侵阶段沉积, 陡三段海侵达到高位, 陡四段为海退沉积, 整个陡山沱组沉积构成一个较完整的海侵—高位—海退沉积旋回。

3.2.1 陡一段碳酸盐缓坡相沉积特征

陡山沱组是南沱冰期之后的第一套海侵沉积, 因此古陆对陡山沱组沉积影响很大, 在古陆范围内普遍缺失陡山沱一段沉积。

陡一段沉积时, 四川古陆已经存在(见图 7)。该古陆分布面积大, 除现今的四川盆地主体之外, 西南方向延伸至西昌、昭通, 西北方向延伸至宁强。古陆以东的鄂西地区为宽缓的浅水陆棚环境, 其水体深度应在 20 m 左右, 因此沉积了一套厚度不大(2~10 m)、分布较广的碳酸盐岩(盖帽白云岩)。受沉积环境控制, 不同地区岩性差异较大, 在水体较浅的地区如荆门至岳阳一带主要是白云岩、含膏白云岩; 在宜昌至常德、遵义至瓮安一带主要为条带状含泥白云岩、硅质条带白云岩与灰质白云岩, 发育水平层理和层纹状构造; 在怀化、麻阳、凤凰、贡溪、芷江等地, 主要为含锰白云岩、灰质云岩、泥云岩, 水平层理发育, 为浅水陆棚沉积。在保康至城口一带的秦岭海槽地区主要为泥质灰岩、含泥灰岩或云质灰岩夹少量薄层白云岩, 表现为较深

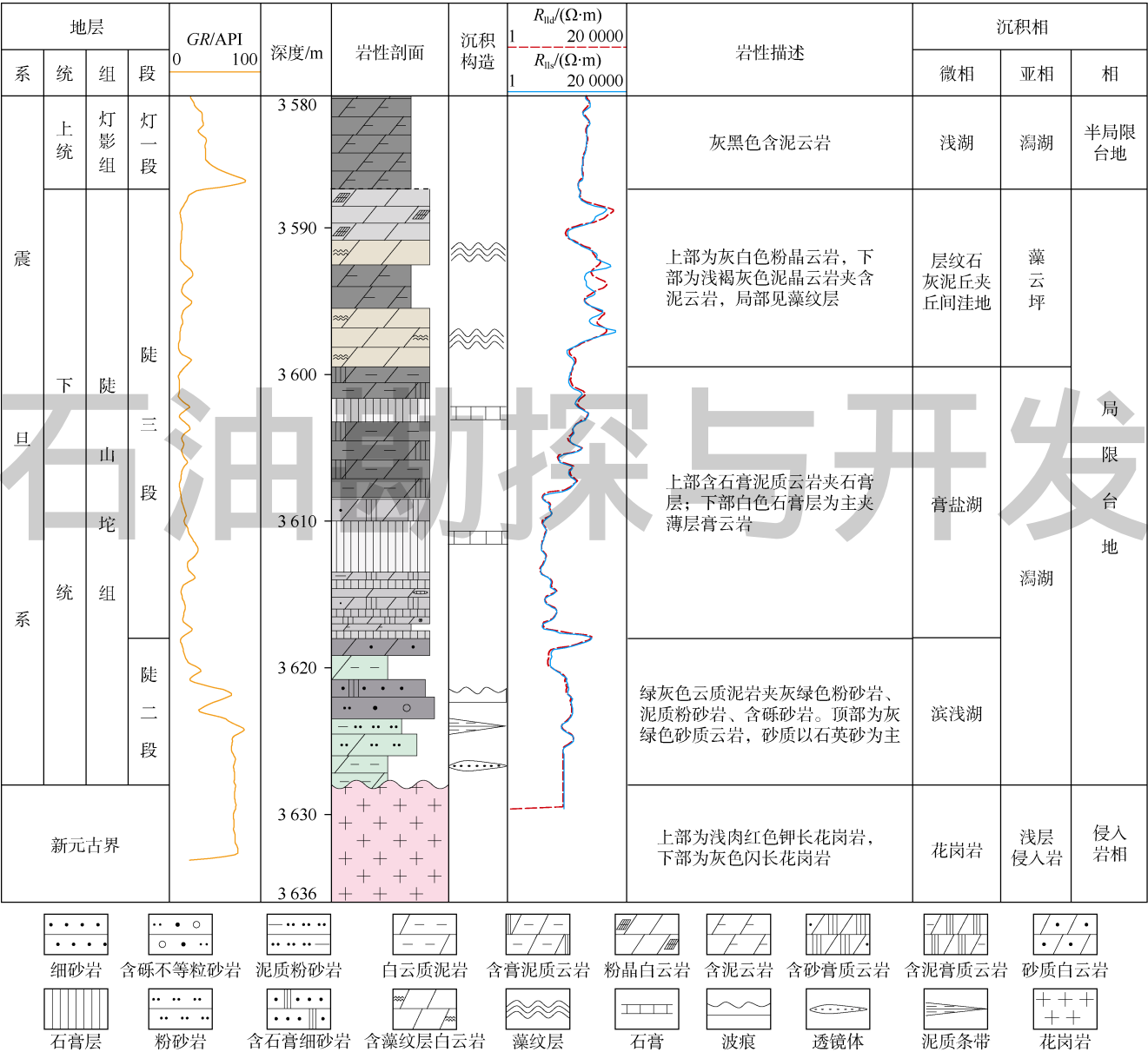


图 5 威 117 井震旦系沉积相剖面（GR—自然伽马； R_{11d} —深侧向电阻率； R_{11s} —浅侧向电阻率）

水陆棚或海盆沉积环境。在川西宁强阳平关至绵竹王家坪及四川古陆主体部位和鄂西东部孝昌地区（孝昌古陆）缺失陡一段碳酸盐岩沉积。在川西北平武地区陡山沱组为一套变质灰岩夹黑色泥质板岩，无法与其他地区分段对比，尚不清楚是否有相当于陡一段的相变地层。在古陆的周缘可能有陡一段同时异相的滨岸碎屑岩沉积，但至今没有确切的剖面证实。

根据沉积背景、沉积厚度及岩性特征，陡一段沉积表现为宽缓陆棚上的碳酸盐缓坡沉积。由于沉积厚度较薄（2~10 m），可以认为是碳酸盐缓坡的初期阶段，或称非典型碳酸盐缓坡。对于盖帽白云岩，杨爱华等^[10]也认为是碳酸盐缓坡沉积。根据岩性分布和古构造背景，陡一段碳酸盐缓坡可以划分为内缓坡、中

缓坡、外缓坡-盆地等几个沉积环境。荆门至岳阳一带主要是内缓坡潮间-潮上带沉积；宜昌至常德、遵义至瓮安一带主要是中缓坡潮间-潮下带；保康至城口一带的秦岭海槽地区主要为外缓坡-盆地相潮下带沉积。

3.2.2 陡二段滨岸-潮坪-潟湖-混积陆棚、浅水陆棚、深水陆棚-海盆相特征

陡二段是中—上扬子地区广泛海侵时期的沉积（见图 8）。受海侵影响，陆地面积迅速缩小，至陡二段沉积晚期，曾广泛暴露的四川古陆、滇黔古陆大部分被海水淹没，仅在较高部位还有部分残余古陆，分别是汉南古陆、开江古陆、天全古陆、会泽古陆和孝昌古陆。在古陆上沉积了一套浅水碎屑岩夹碳酸盐岩和膏盐沉积，古陆周缘的边缘凹陷则沉积了大套以黑

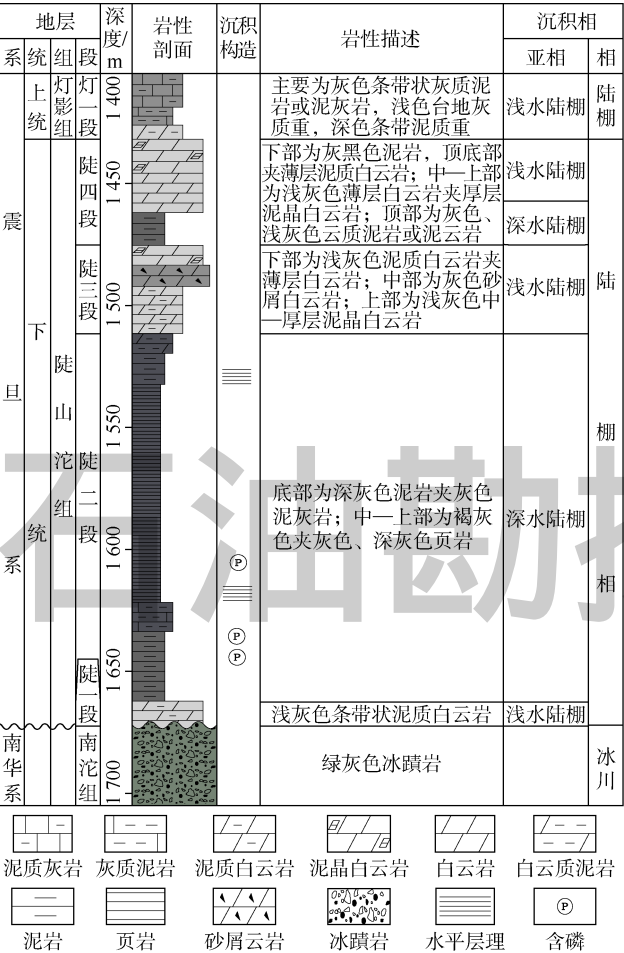


图 6 宜地 4 井陡山沱组沉积相剖面

表 1 中—上扬子地区陡山沱组沉积体系

沉积体系	沉积相	亚相	微相及主要岩石类型	发育层位
碳酸盐 台地	局限—半局限台地	藻丘、丘间洼地、 颗粒滩、藻云坪、蒸发潟湖	藻纹层白云岩、微晶凝块白云岩，含磷叠层石白云岩； 氧化色砂泥岩，泥质白云岩、硅质条带白云岩、砂屑白云岩	陡三段
	台缘斜坡	上斜坡、下斜坡	微晶凝块灰泥丘、条带状泥晶碳酸盐岩、瘤状碳酸盐岩、 滑塌角砾状碳酸盐岩，浊积岩、深色泥岩、硅质岩	陡三段
	潟湖	泥岩潟湖、膏盐湖	灰绿色泥岩、含硬石膏白云岩、石膏层，交错层理砂泥岩	陡二段 陡四段
滨岸、 潟湖	潮坪	潮上、潮间、潮下	泥坪、沙坪、混合坪，含泥膏质白云岩	陡二段
	滨岸	临滨、前滨、后滨	沙滩、砂坝	陡三段 陡四段
陆棚、 海盆	陆棚	浅水陆棚、深水陆棚、	条带状白云岩、中薄层云质泥岩、硅质泥岩、泥质白云岩、	陡一段至
	海盆	海盆	含磷云质砂岩、黑色页岩	陡四段

②浅水陆棚。在神农架武山陡二段主要为灰黑色炭质页岩、灰色泥岩夹粉砂质泥岩、含磷粉砂岩及薄层状白云岩，东蒿坪则主要为深灰色炭质页岩、黑色页岩夹白云岩；秀山榕溪、泸溪洗溪、淑浦董家河陡二段为灰黑色泥岩与条带状泥质白云岩互层夹黑色硅质页岩；遵义松林为黑色页岩、硅质页岩夹少量薄层泥质白云岩或白云岩，属于浅水陆棚沉积。石门杨家坪、常德太阳山陡二段主要为深灰色泥质灰岩或泥质白云岩夹深灰色页岩，灰质或白云质成分较多，为浅

色页岩夹硅质岩为主的黑色岩系。该时期可能发生大规模的火山喷发，在湖北宜昌、湖南石门县中岭、沅陵县岩屋潭、洗溪、贵州江口县瓮会、三穗县兴隆等地陡二段夹有多层火山灰。

陡二段沉积环境可划分为滨岸-潮坪-潟湖-混积陆棚、浅水陆棚及斜坡-海盆。

①滨岸-潮坪-潟湖-混积陆棚。残余古陆成为陡山沱组沉积期重要的物源供应地，围绕古陆发育广泛的滨岸-潮坪-潟湖-混积陆棚相砂泥岩夹白云岩、膏盐沉积。在川北地区旺苍干河、川中地区威远、高石梯、龙女寺钻井都分别发现大套紫红色砂岩、石英砂砾岩、灰绿色、紫红色泥岩，表明陡山沱组沉积期川北—川中地区为干旱的滨岸-潮坪-潟湖-混积陆棚沉积环境；在川西地区陡二段底部为紫灰色长石石英砂岩向上为灰绿色粉细砂岩、泥质粉砂岩和紫红色粉砂质泥岩（绵竹王家坪剖面），在川西南峨边先锋—越西小相岭地区主要为灰白色长石-石英砂岩夹硅质白云岩，发育交错层理和板状斜层理，上部为紫红色钙质页岩夹少量黑色泥灰岩，属于滨岸-潟湖沉积。川东地区鄂参 1 井陡二段为灰绿色泥岩、泥质粉砂岩、灰质石英粉砂岩，属于混积陆棚沉积。鄂西东部京山厂河—薛家店地区陡二段主要为褐灰色炭质页岩夹含锰页岩、含磷页岩，黄绿色、灰绿色粉砂质页岩夹含磷黏土岩，紫红色砂岩、灰褐色含砾砂岩，属滨岸-潟湖或海湾沉积。此时长宁凹陷为一封闭—半封闭海湾，沉积了一套厚达 400 m 的含石膏沉积。

水陆棚沉积。

③深水陆棚-海盆。四川古陆的边缘地带快速变陡，形成坡度较陡的深水陆棚，并迅速过渡为深水盆地。在鹤峰白果坪、秭归三斗坪、宜地 4 井、城口修齐高观、宁强阳平关、绵竹王家坪等地都沉积了大套以灰黑色页岩为主的地层，这些沉积在古陆周边的深水盆地中形成了清平凹陷、宁强凹陷、城口凹陷、鹤峰凹陷等几个沉积中心，位于沉积中心的王家坪、阳平关、修齐高观和白果坪剖面黑色岩系厚度都在 580~1 840 m。

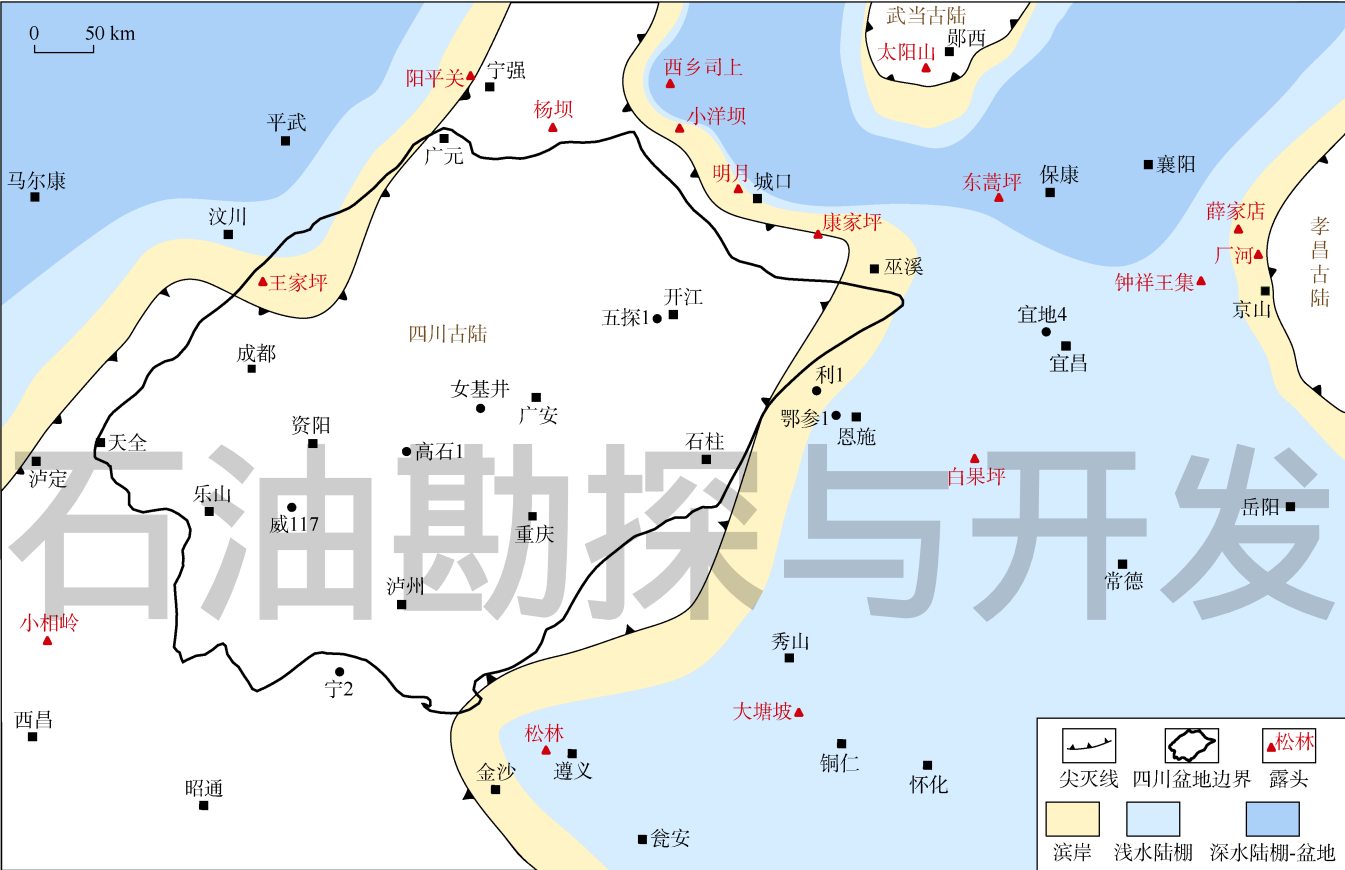


图 7 中—上扬子地区陡山沱组一段岩相古地理图

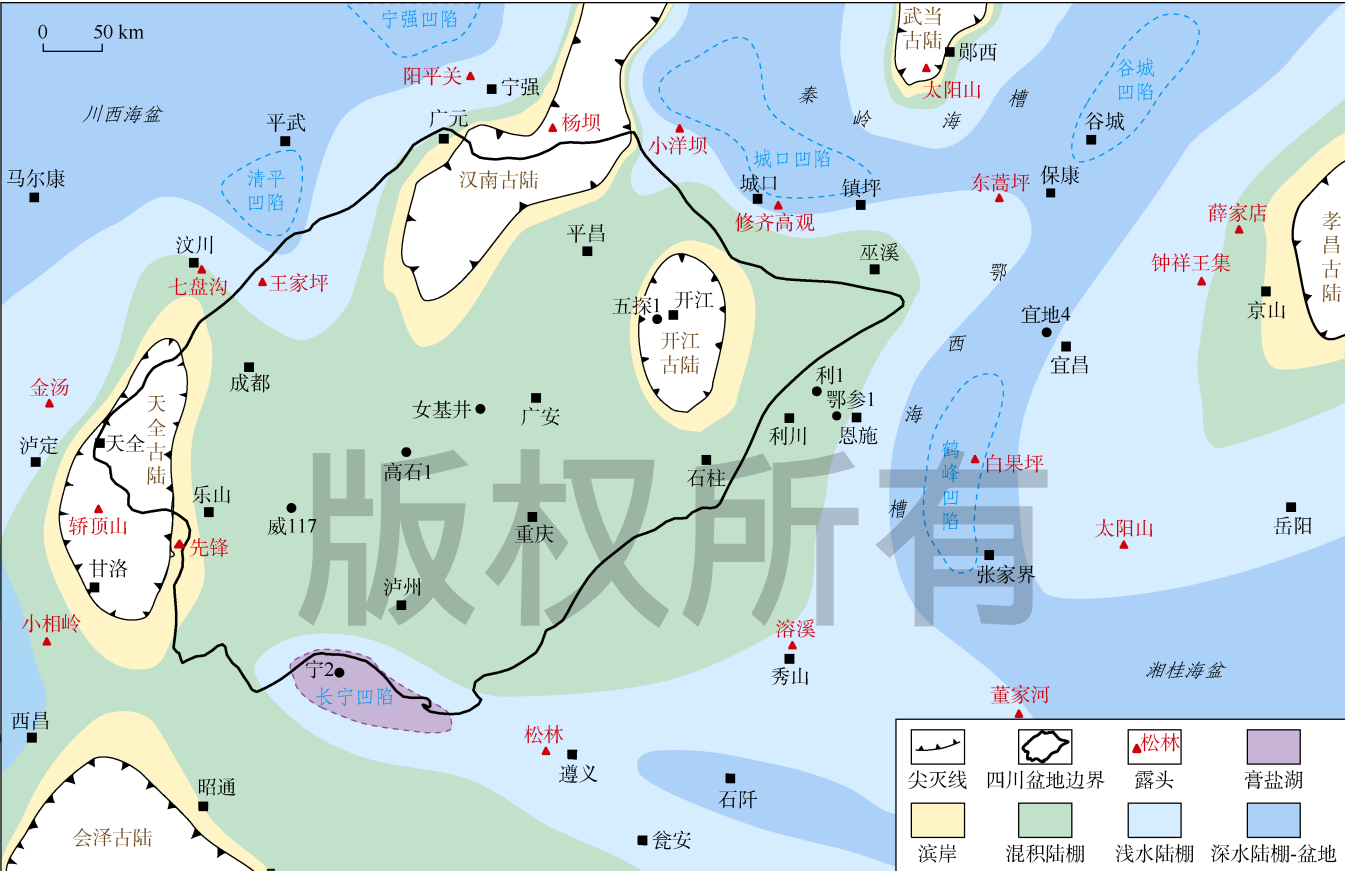


图 8 中—上扬子地区陡山沱组二段岩相古地理图

湖南安化留茶坡、莲花台、松子坳，桃江天井山等地，陡二段主要为黑色炭质页岩、硅质页岩夹硅质岩，沉积环境为海盆相饥饿盆地。

3.2.3 陡三段滨岸-局限一半局限台地、浅水陆棚、深水陆棚-海盆沉积相特征

陡三段主要为碳酸盐岩沉积（见图 9），是陡山沱组沉积期海侵达到最高位时期的沉积，古陆进一步缩小，并出现了局部分化。围绕古陆仍然是滨岸碎屑岩沉积；在远离古陆的地区形成局限—半局限台地，边缘凹陷区形成深水盆地。

陡三段沉积以碳酸盐岩为主，但厚度并不大，四川盆地主体部分厚度仅为 10~20 m，并夹有泥质碳酸盐岩，局部含膏盐。由于分布较为广泛，水体较浅，似又有陆表海沉积特征，简单套用威尔逊台地模式比较牵强，故本文处理为陆表海模式与威尔逊模式的融合，可以称之为非典型碳酸盐台地模式。这种碳酸盐沉积体可能为碳酸盐台地的初级阶段，由于形成时间短，尚未达到典型碳酸盐台地（缓坡或镶边台地）的规模。在专著《灰泥丘系统分类及石油地质特征》一书中曾把这种沉积类型称为前台地沉积^[18]。

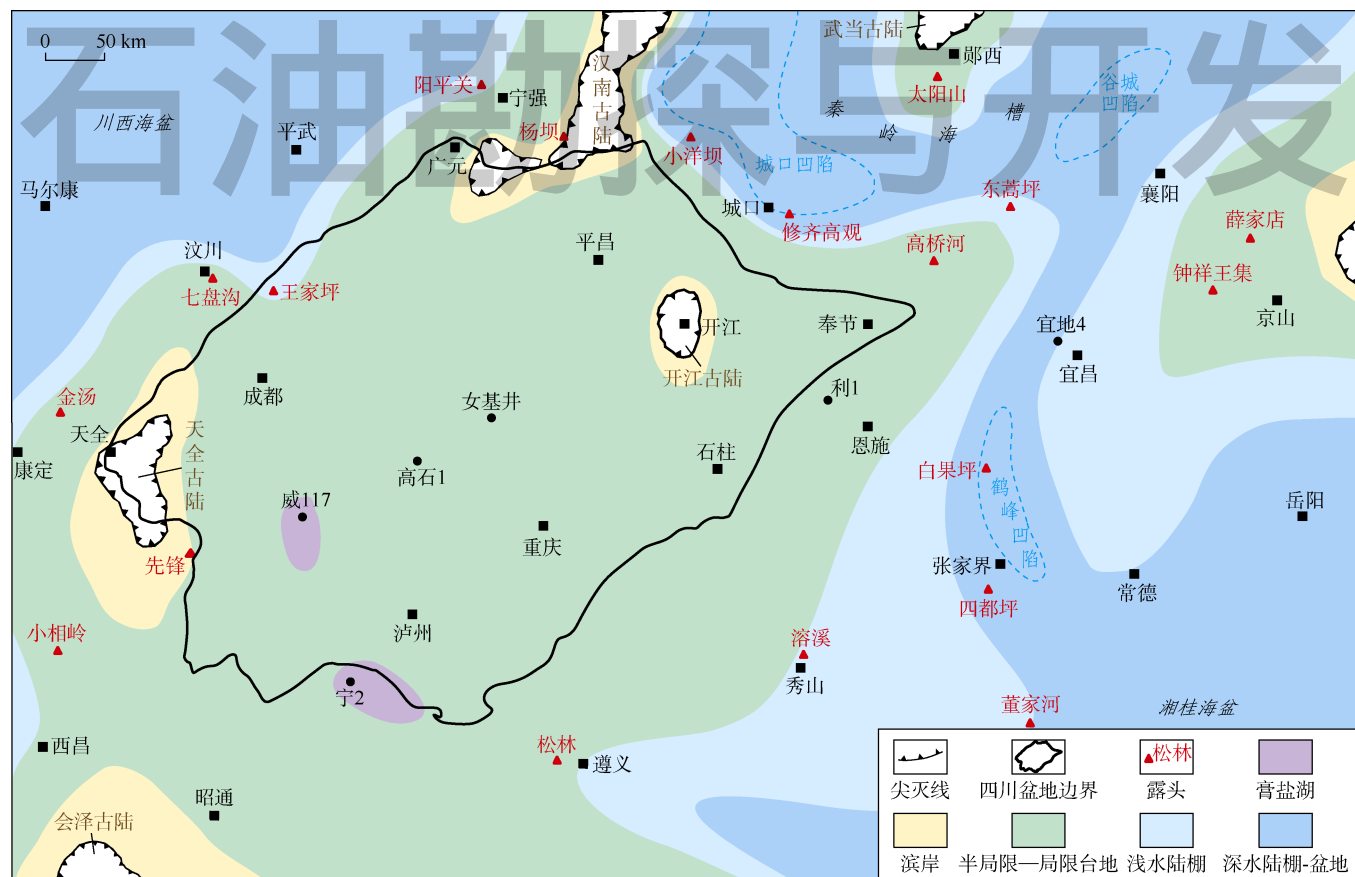


图 9 中—上扬子地区陡山沱组陡三段岩相古地理图

①滨岸。陡三段沉积期古陆有汉南古陆、开江古陆、天全古陆、孝昌古陆及武当古陆和会泽古陆。古陆上缺失陡山沱组沉积。围绕古陆的是滨岸碎屑岩沉积。南江杨坝剖面陡山沱组底部的黄灰、绿灰色砂岩含白云质,可能为陡三段的滨岸沉积,与远离古陆的台地相碳酸盐岩可能为相变关系。

②局限—半局限台地。该相带主要分布在古隆起的主体部位，形成四川和鄂西两个相互独立的碳酸盐台地，二者之间有鄂西海峡分隔。川中地区威 117 井陡三段上部为灰白色粉晶云岩浅褐灰色泥晶云岩夹含泥云岩，发育藻纹层，下部为含石膏泥质云岩夹白色

石膏层,为局限台地藻云坪-膏盐湖沉积。在鄂西钟祥王集、太极垭,黔北开阳、瓮安地区陡三段主要为灰色、灰白色微晶凝块白云岩、含磷白云岩,并有大量含磷叠层石白云岩形成的灰泥丘沉积^[17]。叠层石的生长一般需要局限海环境,如现今澳大利亚的 Shark Bay、巴哈马台地等均有叠层石生长。陡三段叠层石沉积环境也应为局限海台地或局限海湾环境。

③浅水陆棚（或斜坡）。在台地的外围分布有浅水陆棚或斜坡。其主要沉积特征是灰色、深灰色泥晶白云岩、含泥白云岩或石灰岩夹黑色页岩。总体上以碳酸盐岩为主，夹灰黑色页岩或泥岩，白云岩含磷，并

夹磷块岩，在一些地方可形成大型磷矿，如湖北神农架地区、怀化董家河地区的磷矿就分布在陡三段白云岩地层中。

④深水陆棚-海盆。沉积以黑色页岩、硅质页岩为主，夹薄层白云岩、泥质白云岩、硅质白云岩、泥灰岩或薄层泥晶灰岩，主要分布在古隆起的边缘拗陷地区。在秦岭海槽地区陡三段主要为薄层状灰岩、泥灰岩或瘤状灰岩；在鹤峰白果坪，陡三段主要为黑色页岩夹薄层白云岩、泥质白云岩；张家界四都坪地区陡三段为含炭泥质云岩、灰质白云岩、硅质白云岩，并夹大套浊积岩和碎屑流沉积。在湖南安化松子坳，桃江天井山陡三段沉积为黑色炭质页岩，表现为深水海盆沉积。

3.2.4 陡四段滨岸-陆棚-海盆沉积相特征

陡四段沉积由于后期剥蚀，在四川古隆起上大部分地区缺失或没有沉积，仅在古隆起的边缘和边缘拗陷及鄂西陆棚地区有所保留。川北杨坝地区陡四段为一套滨岸碎屑岩沉积，岩性主要为石英砂岩、粉砂岩夹灰色、灰绿色泥岩，为滨岸-潟湖相。秦岭海槽内城口-镇坪一带主要为深灰色泥岩、页岩夹泥灰岩或云质石灰岩，为深水陆棚-海盆沉积；鄂西地区主要为黑色页岩夹泥质灰岩、薄层白云岩、泥质云岩、硅质白

云岩为浅水陆棚沉积；在湖南安化、桃江、沅陵、溆浦陡四段主要为黑色硅质页岩夹硅质岩，为深水海盆沉积。

4 勘探意义

震旦系是中国南方地区沉积矿产资源较丰富的层系之一，包括常规天然气、页岩气、磷矿、锰矿等^[27-29]，在四川盆地及邻区已发现了安岳特大型气田、宜昌页岩气富集区、黔—湘—鄂磷矿带等，这些大型、特大型矿产都与陡山沱组沉积有关。位于川北地区城口凹陷的高燕锰矿是中国大型锰矿之一，主要产出于陡山沱组黑色页岩中。

陡山沱组是中国南方地区重要的烃源岩层系之一，研究其分布规律将对拓展震旦系常规天然气勘探有重要意义，同时也对页岩气、磷矿、锰矿等矿产的选区评价有重要指导意义。对四川盆地周缘遵义松林、重庆秀山、川东北地区城口等露头剖面陡山沱组黑色页岩、泥岩的系统分析（见表 2）表明，陡山沱组烃源岩主要集中分布在陡二段，TOC 值普遍大于 1.0%，部分样品 TOC 值高达 13.8%，是一套优质烃源岩；其干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为-31‰， R_o 值普遍超过 2.0%，目前达到高一过成熟生气阶段。

表 2 四川盆地周缘露头陡山沱组烃源岩实验分析数据统计表

剖面名称	层段	岩性	沉积环境	TOC/%	干酪根 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$R_o/\%$	样品数量/块
峨边先锋	陡二段	泥岩	潟湖	0.78~4.64/2.42	-32.4~-29.0/-30.4	3.26~3.54	6
松林六井	陡二段	泥岩	浅水陆棚	0.11~4.64/1.51	-31.5~-30.3/-30.8	2.08~2.34	35
松林大石墩	陡二段	泥岩	浅水陆棚	0.62~3.33/1.92	-31.2~-30.7/-30.9	3.46~3.82	13
秀山孝溪	陡二段	页岩	浅水陆棚	1.69~13.87/6.26	-32.0~-29.7/-31.4	3.14~3.46	43
城口明月	陡二段	页岩	深水陆棚	0.75~13.10/3.29	-32.8~-29.7/-32.1	2.86~3.22	60

注：表中数值范围表示“最小值~最大值/平均值”

陡山沱组烃源岩分布与沉积环境有较大关系（见图 10），烃源岩厚值区及有机碳高值区（TOC>2.0%）主要分布于城口凹陷、鄂西海槽等古隆起的边缘凹陷。秦岭海槽、鄂西海槽等地区，都广泛发育巨厚的黑色页岩，城口凹陷及鹤峰凹陷厚度可达 500 m 以上。

陡山沱组陡二段、陡四段黑色页岩发育，是重要的页岩气勘探领域。目前，宜昌地区的鄂阳页 1 井在震旦系陡山沱组钻遇灰黑色炭质泥岩 230 m，TOC 值为 1.5%~2.5%，现场测试含气量为 4.8 m³/t，页岩气测试产量达 5 460 m³/d，显示了该区陡山沱组良好的勘探前景。秦岭海槽、鄂西、黔北、黔东等地区陡山沱组页岩分布广泛，是页岩气选区评价的有利地区。

从储集条件考虑，陡山沱组陡二段顶部碎屑岩和陡三段微生物碳酸盐岩均发育溶蚀孔洞，目前已发现多个大型磷矿，如贵州开阳—瓮安磷矿和宜昌磷矿、怀化董家河磷矿。从沉积相分析看，磷矿沉积分布在浅水陆棚和台地边缘，这与浅水陆棚和台地边缘是上升洋流活动区和卸载区有关。

综上，陡山沱组陡二段发育优质烃源岩，陡三段发育微生物碳酸盐岩储集层，两者构成良好的源-储成藏组合条件，是天然气勘探应重视的新领域。初步评价认为秦岭海槽、鄂西海槽陡山沱组油气成藏条件较好，是天然气（包括页岩气）及磷矿、锰矿等矿产资源勘查的有利区。

- [8] 周传明, 薛耀松, 张俊明, 等. 贵州瓮安磷矿上震旦统陡山沱组地层和沉积环境[J]. 地层学杂志, 1998, 22(4): 308-317.
ZHOU Chuanming, XUE Yaosong, ZHANG Junming, et al. Strata and sedimentary environment of Doushantuo Formation of upper Sinian series in Weng'an phosphate mine, Guizhou[J]. Journal of Stratigraphy, 1998, 22(4): 308-317.
- [9] 柳永清, 尹崇玉, 高林志, 等. 峡东震旦系层型剖面沉积相研究[J]. 地质论评, 2003, 49(2): 9-16.
LIU Yongqing, YIN Chongyu, GAO Linzhi, et al. Study on sedimentary facies of Sinian strata type profile in the eastern gorge[J]. Geological Review, 2003, 49(2): 9-16.
- [10] 杨爱华, 朱茂炎, 张俊明, 等. 扬子板块埃迪卡拉系(震旦系)陡山沱组层序地层划分与对比[J]. 古地理学报, 2015, 17(1): 1-20.
YANG Aihua, ZHU Maoyan, ZHANG Junming, et al. Ediacaran (Sinian) Doushantuo of Yangtze plate sequence stratigraphic division and correlation of formation[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(1): 1-20.
- [11] 邓胜徽, 樊茹, 李鑫, 等. 四川盆地及周缘地区震旦(埃迪卡拉)系划分与对比[J]. 地层学杂志, 2015, 39(3): 239-254.
DENG Shenghui, FAN Ru, LI Xin, et al. Division and correlation of Sinian (Ediacara) series in Sichuan basin and its periphery[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(3): 239-254.
- [12] 赵自强, 邢裕盛, 马国干, 等. 震旦纪分册: 长江三峡地区生物地层学[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
ZHAO Ziqiang, XING Yusheng, MA Guogan, et al. Sinian fascicle: Biostratigraphy of the three Gorges region of the Yangtze river[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983.
- [13] 陈孟毅, 萧宗正, 袁训来. 晚震旦世的特种生物群落: 庙河生物群新知[J]. 古生物学报, 1994, 33(4): 291-304.
CHEN Meng'e, XIAO Zongzheng, YUAN Xunlai. New knowledge of Miaohu biota: A special biota in the late Sinian era[J]. Journal of Palaeontology, 1994, 33(4): 291-304.
- [14] 陈孝红, 张国涛, 胡亚. 鄂西宜昌地区埃迪卡拉系陡山沱组页岩沉积环境及其页岩气地质意义[J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2): 106-116.
CHEN Xiaohong, ZHANG Guotao, HU Ya. Shale sedimentary environment of the Ediacaran Doushantuo formation and its shale gas geological significance in Yichang area, western Hubei[J]. South China Geology and Minerals, 2016, 32(2): 106-116.
- [15] 彭波, 刘羽琛, 漆富成, 等. 鄂西地区陡山沱组页岩气成藏地质条件研究[J]. 地质论评, 2017, 63(5): 1293-1305.
PENG Bo, LIU Yuchen, QI Fucheng, et al. study on geological conditions of shale gas accumulation in Doushantuo formation in western Hubei[J]. Geological Review, 2017, 63(5): 1293-1305.
- [16] 单长安, 张廷山, 郭军杰, 等. 中扬子北部上震旦统陡山沱组地质特征及页岩气资源潜力分析[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1944-1958.
SHAN Chang'an, ZHANG Tingshan, GUO Junjie, et al. Geological characteristics and shale gas resource potential analysis of Doushantuo formation of upper Sinian in northern middle Yangtze[J]. Chinese Geology, 2015, 42(6): 1944-1958.
- [17] 刘静江, 李伟, 张宝民, 等. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 735-753.
LIU Jingjiang, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Sedimentary paleogeography of Sinian in upper Yangtze region[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(6): 735-753.
- [18] 刘静江, 张宝民, 周慧. 灰泥丘系统分类及石油地质特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
LIU Jingjiang, ZHANG Baomin, ZHOU Hui. Stucco mound system classification and petroleum geological characteristics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [19] 杨遵和, 陈远德. 西南地区地层总结: 震旦系[M]. 成都: 地质部成都地质矿产研究所, 1981.
YANG Xianhe, CHEN Yuande. Stratigraphic summary of Sinian system in southwest China[M]. Chengdu: Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Geology, 1981.
- [20] 何政伟, 刘援朝, 魏显贵, 等. 扬子克拉通北缘米仓山地区基底变质岩系同位素地质年代学[J]. 矿物岩石, 1997, 17(S1): 83-87.
HE Zhengwei, LIU Yuanchao, WEI Xiangui, et al. Isotope chronology of basement metamorphic rocks in Micangshan area, northern margin of Yangtze craton[J]. Mineral Rocks, 1997, 17(S1): 83-87.
- [21] 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 等. 川西峨边地区金口河辉绿岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对 Rodinia 裂解的启示[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1131-1141.
CUI Xiaozhuang, JIANG Xinsheng, WANG Jian, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of Jinkouhe diabase dykes in Ebian area of western Sichuan Province and its implications for the breakup of Rodinia[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1131-1141.
- [22] 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 等. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因[J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(8): 687-697.
CHEN Yuelong, LUO Zhaozhua, ZHAO Junxiang, et al. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2005, 48(5): 622-634.
- [23] 凌文黎, 周炼, 张宏飞, 等. 扬子克拉通北缘元古宙基底同位素地质年代学和地壳增生历史: II. 火地垭群[J]. 地球科学, 1996, 21(5): 491-494.
LING Wenli, ZHOU Lian, ZHANG Hongfei, et al. Proterozoic basement isotope chronology and crustal growth history in the northern margin of Yangtze craton: II. Huodita group[J]. Earth Science, 1996, 21(5): 491-494.
- [24] LI Z X, LI X H, KINNY P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Res, 2003, 122(1): 85-109.
- [25] 王鸿祯, 王自强, 朱鸿, 等. 中国晚元古代古构造与古地理[J]. 地质科学, 1980, 15(2): 103-111.
WANG Hongzhen, WANG Ziqiang, ZHU Hong, et al. Late Proterozoic tectonics and paleogeography in China[J]. Geological Sciences, 1980, 15(2): 103-111.
- [26] 滕吉文, 魏斯禹. 中国四川攀枝花—西昌(攀西)裂谷的形成、演化与裂谷分类[J]. 大地构造与成矿学, 1987, 11(1): 70-79.
TENG Jiwen, WEI Siyu. Formation, evolution and rift classification of Panxi rift in Sichuan, China[J]. Geotectonics and Metallogeny, 1987, 11(1): 70-79.
- [27] 赵东旭. 四川城口陡山沱组的 Epiphyton 锰质叠层石[J]. 科学通报, 1992, 37(20): 1873-1873.
ZHAO Dongxu. Epiphyton manganese stromatolite of Doushantuo formation, Chengkou, Sichuan[J]. Science Bulletin, 1992, 37(20): 1873-1873.
- [28] 万平益, 罗锋. 重庆市城口锰矿地质特征与成因及成矿远景分析[J]. 中国锰业, 2000, 18(3): 5-8.
WAN Pingyi, LUO feng. Geological characteristics, genesis and metallogenic prospect analysis of Chengkou manganese mine in Chongqing[J]. China Manganese Industry, 2000, 18(3): 5-8.
- [29] 夏学惠, 袁俊宏, 杜家海. 中国沉积磷矿床分布特征及资源潜力[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(2): 6-11.
XIA Xuehui, YUAN Junhong, DU Jiahai. Distribution characteristics and resource potential of sedimentary phosphate deposits in China[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(2): 6-11.

第一作者简介: 汪泽成(1966-), 男, 安徽太湖人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事含油气盆地构造、油气地质综合研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院专家室, 邮政编码: 100083。E-mail: wangzecheng@petrochina.com.cn

联系作者简介: 刘静江(1968-), 男, 河南驻马店人, 博士, 中国石油塔里木油田勘探开发研究院高级工程师, 主要从事碳酸盐沉积储集层研究和油气藏评价工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院四川盆地研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: liujj6@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-05-14 修回日期: 2018-10-25

(编辑 魏玮)