

引用格式:张金川,陶佳,李中明,等.中国页岩剖面区域分布及其页岩气地质意义[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):29-46.

ZHANG Jinchuan, TAO Jia, LI Zhongming, et al. Regional distribution of field shale outcrop in China and its shale gas significance[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1):29-46.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.003

## 中国页岩剖面区域分布及其页岩气地质意义

张金川<sup>1,2</sup>,陶佳<sup>1,2</sup>,李中明<sup>3</sup>,杨圆圆<sup>1,2</sup>,王东升<sup>1,2</sup>,张栋<sup>3</sup>,李谦超<sup>1,2</sup>,武向真<sup>1,2</sup>,牛嘉亮<sup>1,2</sup>,赵星旭<sup>1,2</sup>,郎岳<sup>1,2</sup>  
(1.中国地质大学,北京100083;2.自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室,北京100083;  
3.河南省地质调查院,河南郑州450001)

**摘要:**我国页岩分布在平面上广泛、时间上连续、空间上复杂,笔者对华北、华南、塔里木板块页岩分布进行了系统梳理和讨论。中、上元古界页岩以海相为主兼有陆相,发育滨浅海至浅海陆棚相、海相和陆相冰碛页岩,页岩剖面以见于不同古板块的边缘为特点。下古生界页岩以海相为主,发育广海陆棚相至浅海陆棚相页岩,页岩主要分布在华南板块和塔里木板块内部。上古生界页岩以海陆过渡相为主,兼有不同程度的海相和陆相,具有最广泛的发育和分布。中、新生界页岩类型多样但以陆相为主,中生界页岩沿近南北向的滇、川、陕和近东西向的新一陕—黑—一线为主,新生界页岩主要发育在华北板块的东、西两侧。板块边缘、褶皱带及复杂构造活动区对页岩剖面分布具有重要影响,古海槽对页岩沉积、沉积环境对页岩成分、成分对页岩剖面的抗风化能力等均具有明显的影响作用。不同时代和地区的页岩剖面发育受多种因素影响,各具不同的地质特点。页岩剖面可分为锰质、硅质、灰云质、粉砂质、炭质、煤质及混合型7种,炭质型可出现在各种剖面中。其中的锰质型页岩主要见于华南板块中二叠统及更老地层中,硅质型页岩主要见于广海陆棚相,煤质型页岩发育时代较晚且主要见于海陆过渡相和陆相,粉砂质和灰云质型分布广泛。页岩类型各具有不同的时代性和地域性分布特点,对我国页岩层系进行系统梳理,有助于页岩气新区新层系研究。

**关键词:**板块;页岩时代;页岩岩性;页岩分布;野外剖面;页岩类型;页岩气意义

中图分类号:TE13

文献标识码:A

### Regional distribution of field shale outcrop in China and its shale gas significance

ZHANG Jinchuan<sup>1,2</sup>, TAO Jia<sup>1,2</sup>, LI Zhongming<sup>3</sup>, YANG Yuanyuan<sup>1,2</sup>, WANG Dongsheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Dong<sup>3</sup>, LI Qianchao<sup>1,2</sup>,  
WU Xiangzhen<sup>1,2</sup>, NIU Jialiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Xingxu<sup>1,2</sup>, LANG Yue<sup>1,2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Resource Strategic Evaluation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** In China, shales are widely distributed, continuous in time and complex in space. In this paper, the distribution of shales in the North China, South China and Tarim Plates are systematically sorted out and discussed. The Middle and Upper Proterozoic shales are dominated by marine facies with some continental facies, of which the littoral-neritic to neritic shelf, marine and continental moraine shales are developed, and the field shale sections are characterized by the distribution on the edges of different paleoplates. The Lower Paleozoic shales are dominated by marine facies, with the development of open shelf to neritic shelf shales, which are mainly distributed in the South China Plate and the Tarim Plate. The Upper Paleozoic shales which are dominated by marine-continental transitional facies and locally by marine and continental facies have the largest development and distribution in China. The Mesozoic and Cenozoic shale types are diverse but dominated by continental facies. The Mesozoic shales are mainly developed longitudinally along Yunnan, Sichuan and Shanxi and latitudinally from Xinjiang to Heilongjiang via Shanxi, while the Cenozoic shales are primarily developed in the eastern and western sides of the North China Plate. The plate margins, fold belts and complex tectonic activity areas exert an important impact on the distribution of shales. The ancient trough has a significant

收稿日期:2021-10-09。

第一作者简介:张金川(1964—),男,博士,教授,本刊第二届编委会委员,从事非常规油气地质研究。地址:北京市学院路中国地质大学(北京)能源学院,邮政编码:100083。E-mail: zhangjc@cugb.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金“页岩含气性关键参数测试及智能评价系统”(41927801);河南省重大科技专项“河南页岩气勘查开发及示范应用研究”(151100311000);国家科技重大专项“页岩气分类分级资源评价方法研究”(2016ZX05034-002-001)。

influence on the shale deposition, so do the depositional environment on the shale components, and the components on the weathering resistance of field shale sections. The development of field shale sections in different epochs and regions are affected by multi-factors, and each has specific geological characteristics. Shale in sections can be divided as manganese, siliceous, calcite or dolomite, silty, carbonaceous, coal and mixed types, in which carbonaceous shale can occur in various sections. Manganese shale is primarily developed in the strata before Middle Permian in South China Plate, while siliceous shale is mainly found in the open shelf facies, coal-type shale is developed later and mainly deposited in the marine-continental transitional facies and continental facies, The silty, calcite or dolomite shales are widely distributed. Each type of shale has specific epochal and regional distribution characteristics, so a systematic review of the shale strata in China could be helpful for the discovery for more shale gas in new strata or new areas.

**Keywords:** plate; shale age; shale lithology; shale distribution; field outcrop; shale type; significance for shale gas

自中晚元古代以来,中国先后在不同地区形成了多种类型的页岩。尽管沉积背景、地层厚度、岩性组合、有机地球化学参数及页岩气评价地质指标各有不同,但各大地质区、地理区及主要时代均有页岩的形成和分布<sup>[1-2]</sup>,构成了我国页岩气勘探开发的物质基础。华北、华南、塔里木等板块地质演化历史长、稳定性差,在进入中生代以后相互作用强烈,多次构造运动产生了一系列页岩沉积,为页岩气研究提供了丰富素材。

尽管我国页岩气产业发展迅速,仅用了很短的时间就实现了工业化规模开发,使年产页岩气量突破了200亿立方米并走在了国际前列,但我国的页岩气勘探开发仍然处于早期的探索发展阶段,需要不断发现新的方向领域、资源类型、有利区域及目标层系。从野外剖面入手,系统梳理、认识我国不同时代和类型特点的页岩,具有重要的页岩气选区和评价意义。

## 1 页岩地层发育背景

中国陆域主要由华北、华南、塔里木板块(或地台)及不同时期的拼贴地块和褶皱带所组成,它们控制了主要页岩的发育。

### 1) 华北板块

从始太古代开始,华北陆核逐渐出现,从火山岩堆积不断转向沉积岩发育,诞生了我国最早的陆块。至吕梁运动结束,区域变质作用基本停止,褶皱地层上升为陆并向稳定的克拉通方向发展,华北地台(板块)基底形成。从元古代开始,华北板块进入了构造变形与岩浆活动微弱的陆缘沉积阶段,在板块北缘的燕辽海槽区开启了富有机质页岩沉积的新时期。

晋宁运动期间,中一新元古代沉积相对稳定,形成了以潮间—浅海陆棚为主的黑色页岩沉积。

兴凯—加里东运动早期,华北地台保持稳定的陆表海状态,形成了一套浅海相为主的灰岩、白云岩、砂岩及杂色页岩地层组合。从中晚奥陶世开始至早中石炭世,地层普遍缺失。海西运动期,海水再次入侵,在中国北方地区形成了分布广泛的海陆过渡相和陆相含煤页岩地层。进入中—新生代,华北板块内部构造运动逐渐变强,分隔差异演化明显,主要为陆内发展阶段所控制的陆相沉积。这些陆相盆地叠置在先期地层之上,分隔性明显的河—湖—沼泽相页岩沉积盛行。

### 2) 华南板块

进入元古代,华南板块(含扬子板块、滇黔桂和江南地块)逐渐完成了从活动型向稳定型方向的转变,区域变形褶皱及变质作用停止,逐渐开始进入岩浆活动微弱、构造变动平缓的陆缘沉积阶段,沉积了海相和陆相冰碛页岩。

兴凯—加里东构造运动期,早寒武世开始的大规模海侵和局限性较强的晚奥陶世—早志留世海进,形成了分布规模最大的海相页岩。志留纪结束,秦岭洋趋于关闭,华南板块由南高北低转变为北高南低格局,在桂东、黔南出现新的海侵,开始台盆相页岩沉积。海西构造运动期,地壳发生区域抬升并接受剥蚀,随后接受由南向北逐渐推进的海侵作用,在早、晚二叠世先后形成台盆相和海陆过渡相页岩。中、晚三叠世,海水逐渐退去,华南板块进入“活化”阶段,开启陆相页岩沉积时代,主要在滇、黔、桂、川、渝等地区发育三叠系、侏罗系页岩。

### 3) 塔里木板块

塔里木板块的形成时间与华南板块大致相同。

中元古代以浅海—滨海相和冰碛页岩发育为主。南华纪—早奥陶世,塔里木板块处于伸展状态,陆棚和泻湖相控制了页岩的形成和分布。

早、中寒武世和早、中奥陶世,主要在现今塔里木盆地的东部分别形成了蒸发泻湖相和陆棚相含磷页岩。中、晚奥陶世,塔里木板块转变为挤压状态并出现岛弧火山,主要在盆地西部的半封闭—封闭海湾中发育了厚层页岩。石炭纪主要形成滨海湖沼相、河流沼泽相炭质页岩。二叠纪,塔里木板块上升为陆,在塔西南地区可见前三角洲相页岩沉积。中生代以形成山间盆地或山前拗陷为特点,下侏罗统的河漫—沼泽—湖泊相煤系页岩和中侏罗统的湖相页岩发育。

## 2 页岩发育及岩性变化

### 2.1 中元古界

#### 1) 长城系

串岭沟组:为一套形成于滨浅海相,以潮间、潮下、泻湖相为特点的页岩沉积,锆石 U-Pb(锆石定年方法)年龄  $1\ 621 \pm 12\ \text{Ma}^{[3]}$ ,被认为是我国最早的未变质页岩。页岩剖面主要由粉砂质页岩、钙质页岩等组成,富含微古植物化石,可见褐铁矿结核、同沉积现象及岩浆侵入。其底部常可形成宣龙式赤铁矿,为黄绿色、黄褐色、黑灰、黑色细砂质页岩、粉砂质页岩、黑色片状页岩夹浅色薄层状粉砂岩、白云岩和炭质白云岩,顶部为炭质页岩夹含砂、含叠层石白云岩。主要见于沿太行山中北段至燕山一线延伸的燕辽裂隙槽,页岩分布限于冀北、京、津、辽西、晋东北。

#### 2) 蓟县系

洪水庄组:页岩沉积于滨浅海(潮下带)、海湾或浅海陆棚相,为灰绿色或黑色页岩、粉砂质页岩、含碳粉砂质页岩夹泥质白云岩、白云岩,已在多处发现古油藏遗迹。页岩层理发育,锰、铁、钙、硼等元素含量偏高,含砂量较低,发育了碳酸盐、黄铁矿、菱铁矿、硅质(或燧石)及锰质等多种结核。分布范围略小于串岭沟组,沉积中心在辽宁凌源、河北宽城—兴隆、北京密云一线,厚度逾 200 m。

### 2.2 上元古界

#### 1) 青白口系

下马岭组:为形成于滨岸(潮间至潮下)、泻湖、

浅海陆棚等环境中的杂色与黑色页岩,分布范围与串岭沟组和洪水庄组大致相同,但厚度中心出现在怀来和兴隆一带,逾 500 m。沿山脚出露的河北怀来赵家山剖面较为典型,其中的炭质页岩和粉砂质页岩连续厚度 150 m。剖面中含黄铁矿,可见辉绿岩体不规则状刺入其中,可见李泽冈风化环。

#### 2) 南华系

大塘坡组:为一套间冰期灰、灰黑、黑色含锰页岩、炭质页岩、黑色粉砂岩、粉砂质页岩及硬锰矿薄层沉积。厚度中心和典型剖面位于贵州省松桃县大塘坡锰矿区,剖面厚度为 200 m。该处页岩锰含量最高,目前是亚洲最大锰矿所在地。主要见于上扬子板块的东南部边缘,大致以益阳和桂林连线为界,西北侧黔、渝、湘、鄂分布区的页岩主要形成于陆相冰川的间冰期,可见于黔东的台江县、三穗县、铜仁市、松桃县至渝东南的秀山县一线;东南侧的桂、湘、鄂页岩主要形成于海相冰川的间冰期,页岩锰质含量减少,地层厚度减薄。

照壁山组和特瑞爱肯组:下统的照壁山组和上统的特瑞爱肯组剖面均可见于塔里木板块北缘的库鲁克塔格地区,两套地层均为海相间冰期沉积,前者主要为深灰、灰绿、灰褐色细砂岩、粉砂岩及页岩组合,含黄铁矿,剖面厚度超过 500 m,页岩、粉砂质页岩占比 60%;后者主要为暗绿、深灰、灰黑色冰碛泥砾岩、泥灰岩、钙质页岩、粉砂质页岩、薄层灰岩、云质灰岩,含黄铁矿,地层含砾特点明显,剖面厚度为 1 845 m,上段页岩厚度为 617 m<sup>[4]</sup>。

#### 3) 震旦系

陡山沱组:为一套以广海陆棚环境为主,兼有半封闭台地相、浅海—潮坪、泻湖相的炭质页岩(或石煤)、粉砂质页岩、泥灰岩、含磷碳酸盐岩、泥质和硅质岩,含黄铁矿、磷结核等。主要见于滇东、黔东、桂北、川西、渝东南、陕南、豫南、鄂西、湘北、皖南、苏南、浙西北、赣北等地区,在鄂西、黔东等地含磷块岩,同期名称有万家湾组、纳章组、松林组、洋水组、余家洞组、蓝田组、黄墟组等。湖北是厚度中心,含磷碳酸盐岩、炭锰质碳酸盐岩及炭质页岩厚度近 500 m,是我国磷矿的重要产地。地层向四周减薄或出现沉积相变,磷含量降低、页岩占比增加。扬子板块边缘页岩以含硅、含磷、含锰、含炭及含银为主,可夹磷矿层或锰矿层。

育肯沟组和水泉组:发育和分布同照壁山组和

特瑞爱肯组,但成因上属于间冰期的滨海、浅海沉积。下统的育肯沟组为灰绿色页岩、粉砂岩及细砂岩组合,剖面厚度为587 m,页岩厚度占比46%。在塔里木盆地南缘的昆仑山区,(库尔卡克组)见页岩、泥岩、粉砂岩及砂岩,夹磷块岩、菱铁矿及黄铁矿,厚度近500 m;上统的水泉组以灰岩、云岩为主,在122.6 m的剖面中出现了50 m厚的灰褐薄层粉砂岩、粉砂质页岩、砂质灰岩及硅质条带<sup>[4]</sup>,厚度占比41%。

## 2.3 下古生界

### 2.3.1 下寒武统

牛蹄塘组:包含了梅树村阶和筇竹寺阶2个页岩沉积期,为广海陆棚相含磷硅质岩、磷块岩、硅质页岩、砂质页岩、炭质页岩、炭质粉砂质页岩、钙质页岩、粉砂岩等,含黄铁矿、磷结核及镍、钼、铜、钴、钒、铀、银等多金属元素。见于滇、黔、桂、川、渝、湘、鄂、苏、皖、浙等地(图1),有筇竹寺组、水井沱组、凉水井组、九老洞组、邱家河组、郭家坝组、鲁家坪组、东坑组、王音铺组、荷塘组、幕府山组等同期别名。川、渝、黔一带是牛蹄塘组页岩发育中心,厚逾500 m,其底部可见薄层褐铁矿,硅质含量高;滇、桂、鄂、湘下段多金属元素逐渐增多,含黄铁矿和磷结核,可见石煤或油页岩。

玉尔吐斯组:为一套灰黑色炭质页岩、薄层状硅质岩、粉砂岩、细砂岩及灰岩。底部见磷结核、硅质磷块岩、含磷底砾岩,向上为含胶磷矿灰岩、白云质灰岩、瘤状白云岩,含磷、铀、钒,为浅海陆棚相沉积。剖面可见于柯坪、天山、库鲁克塔格地区,也称为磷矿沟组、西山布拉克组,厚度为130 m。

马店组(猴家山组):华北板块在早寒武世向东南方向倾斜,华北陆表海在现今的豫、鲁、皖、苏一带形成沉降中心,在南华北地区淮南地层小区沉积了一套黑色炭质页岩和钙质粉砂岩系,厚度介于20~100 m。在安徽省霍邱县马店镇王八盖山剖面可见含磷结核的黑色炭质页岩(石煤层),普遍见油浸,含丰富沥青质及磷结核<sup>[6-8]</sup>。

### 2.3.2 奥陶系

#### 1) 下奥陶统

宁国组:受东南海槽影响,在桂、湘、赣、皖、苏一线及其东南地区形成了以半深海相为主、富含笔石

的页岩,以灰绿色至黑色页岩、炭质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩为主,含硅质岩、粉砂岩或细砂岩。桂、粤、闽、湘为厚度中心,桂东南地区(六陈组、升坪组)厚度接近1000 m,皖、浙、赣、粤(下黄坑组)地区厚度介于200~500 m。

黑土凹组:为硅质岩、硅质页岩、粉砂岩、粉砂质页岩、泥质页岩、炭质页岩及灰岩,形成于滨浅海相,剖面厚度超过150 m,见于塔里木板块区。

#### 2) 中奥陶统

胡乐组:沉积和分布与宁国组相似,岩性以硅质岩、硅质页岩、炭质页岩、砂质页岩及泥质页岩为主,其中炭质页岩厚度介于30~50 m。

萨尔干组:为富含钙质的黑色笔石页岩夹灰黑色薄层或凸镜状泥屑灰岩,夹硅质条带,见油苗,厚度不足50 m,为海湾相沉积,主要见于塔里木北缘的柯坪区。

#### 3) 上奥陶统

五峰组:上扬子地区浅海—半深海环境的封闭性较强,川、渝地区为硅质页岩、炭质页岩,局部含钴和锰,厚度不足15 m(图2)。中、下扬子地区的海水开放性明显增强,外来碎屑供给能力增强,页岩地层中的硅质含量明显降低。湖北地区含斑脱岩夹层。

平凉组:为一套浅灰、灰黑色的浅海相钙质页岩及砂质页岩组合,地层以薄层页岩和粉砂岩为主,夹细砂岩、凝灰质砂岩及灰岩,见于陕、甘、宁地区。

印干组:为灰黑色炭质泥灰岩、炭质页岩、钙质页岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩,夹沥青质粉晶灰岩,厚度不足100 m,沉积和分布大致同萨尔干组。

### 2.3.3 下志留统

龙马溪组:为灰黑色炭质页岩、硅质页岩夹粉砂岩和硅质岩,川南、渝东、鄂西的炭质页岩占比最高。向上粉砂质含量逐渐增多,或以泥质灰岩为主,沉积于浅海—半深海海湾相。川南、川中(华蓥山)及龙门山地区龙马溪组分段明显<sup>[10]</sup>,厚度逾300 m。渝东地区厚度超过150 m,炭质页岩厚度介于15~24 m。黔北、滇东北、湖北及下扬子(高家边组)等地的粉砂质含量增加,炭质和钙质减少,地层颜色变浅。

松坎组:为一套灰—深灰色薄层状钙质页岩与薄层状微粒泥质灰岩、泥灰岩互层沉积,页岩占比向上逐渐减少。该组与同期的香树园组局限于黔东南地区,主要见于遵义、湄潭、石阡、印江、沿河、务川、

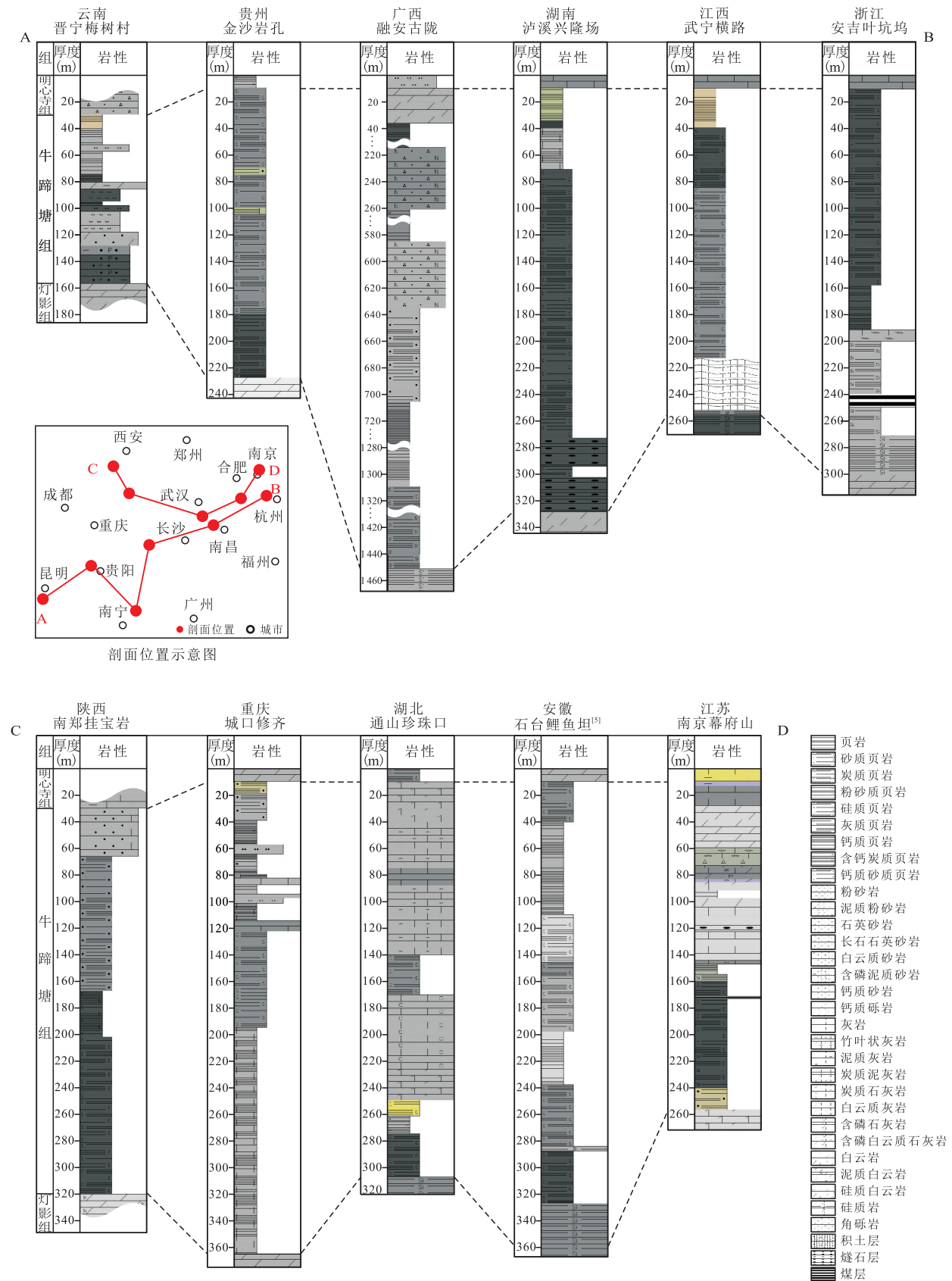


图1 华南板下寒武统(牛蹄塘组)野外剖面对比柱状图

Fig. 1 Stratigraphic comparison columns of shale sections for Lower Cambrian (Niutitang Formation) in South China Plate

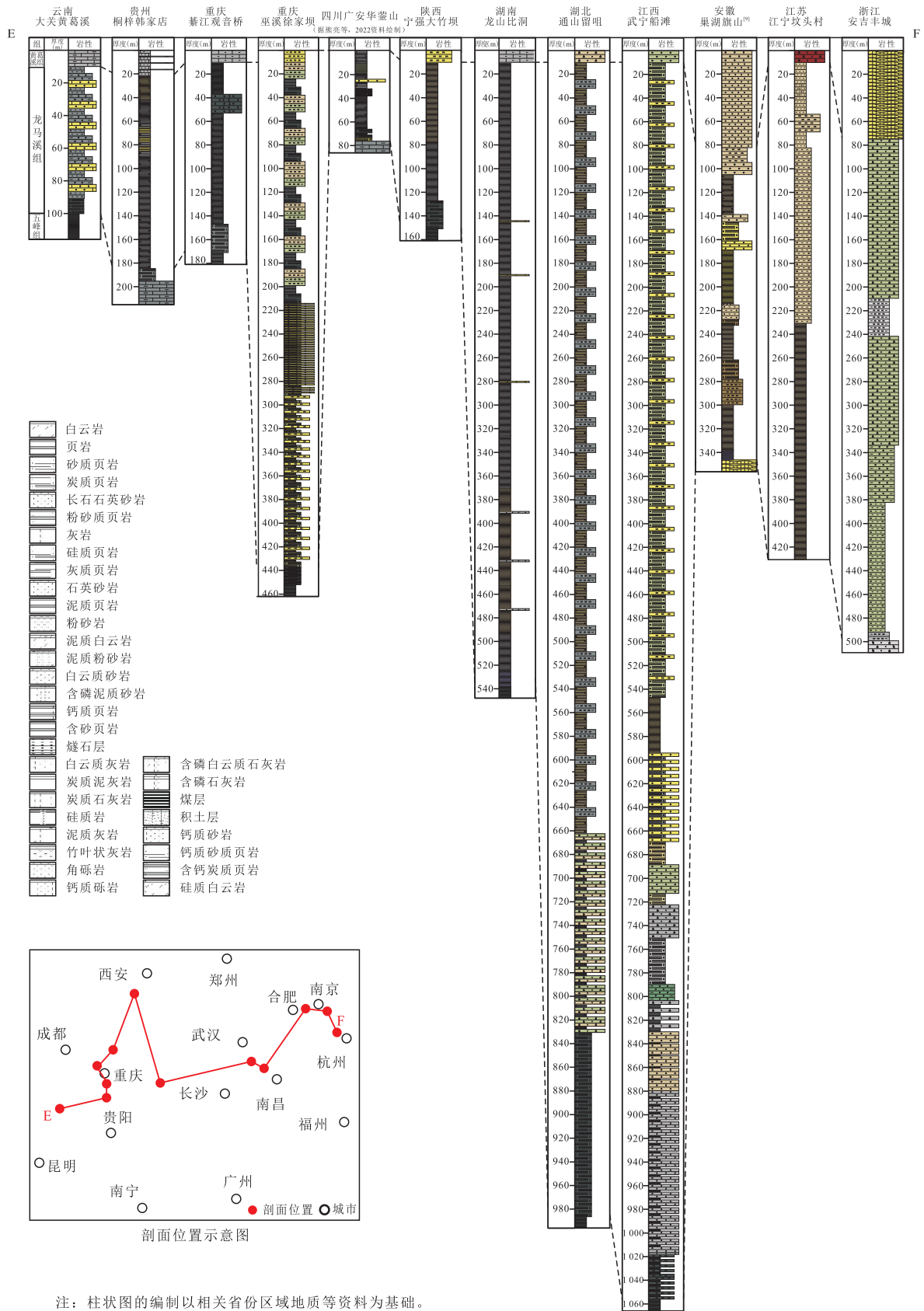


图2 华南板块区上奥陶统(五峰组)和下志留统(龙马溪组)野外剖面对比柱状图

Fig. 2 Stratigraphic comparison columns of shale sections for Upper Ordovician (Wufeng Formation) and Lower Silurian (Longmaxi Formation) in South China Plate

正安、桐梓、仁怀连线所限定的范围内。

柯坪塔格组和尼勒克河组:前者为黄绿、灰黑色硅质岩、粉砂质页岩、页岩、硅质粉砂岩、凝灰质粉砂岩,可见磷块岩,形成于浅海—半深海相。天山—塔里木北缘区剖面厚度接近450 m;后者沉积于浅海相,为灰黑色粉砂岩、炭质灰岩和泥质灰岩。

## 2.4 上古生界

### 2.4.1 泥盆系

#### 1) 下泥盆统

塘丁组:以灰黑色页岩为主,夹炭质页岩、粉砂岩、浅灰色细砂岩和碳酸盐岩,含竹节石、菊石、三叶虫等化石,主要发育在桂北和桂中地区,属于浅海陆棚—局限海台地相沉积。

#### 2) 中泥盆统

纳标组:岩性以灰黑色、黑色页岩为主,夹炭质页岩、泥质灰岩及细砂岩等,为开阔海台地边缘发育的台盆相沉积,主要分布在桂北、黔南地区,炭质页岩厚度为70 m。

罗富组(火烘组):为深灰—灰黑色含钙质页岩、页岩与泥质灰岩、灰岩互层,夹砂岩、炭质页岩、含磷炭质页岩及硅质岩,剖面中可见灰黑色、黑色页岩近300 m,其沉积和分布同纳标组。

克孜勒陶组:浅海相黑色页岩、粉细砂岩、泥质硅质灰岩、生物灰岩,剖面厚度千余米,见于昆仑山区。

#### 3) 上泥盆统

榴江组(响水洞组):为台盆相浅灰—灰黑色薄层状硅质岩夹页岩、硅质页岩、灰岩、砂质页岩,局部夹锰矿层或含锰、含磷硅质岩,剖面厚度超过150 m,主要见于广西。

洪古勒楞组:凝灰质砂岩、凝灰质硅质粉砂岩、泥质硅质灰岩、硅质粉砂岩、硅质页岩,主要为海陆过渡相,见于天山西段。

### 2.4.2 石炭系

#### 1) 下石炭统

岩关组:为滨浅海相、沼泽相炭质页岩、粉砂质页岩、粉砂岩、硅质岩、泥灰岩及灰岩组合,夹锰土、磷矿层(尧云岭段或汤耙沟组)、煤层或菱铁矿(英塘段或祥摆组),厚度超过100 m,见于黔、桂、湘等地区。

大塘组:为黑色页岩、炭质页岩、粉砂岩、钙质页岩、泥灰岩、灰岩、硅质岩及硅质页岩组合。页岩以滨海相、沼泽相含煤层、黄铁矿结核及油页岩(寺门段或旧司组)和台地边缘斜坡相含铁质结核(黄金段或打屋坝组)为特点,以炭质页岩为主的地层厚度超过400 m,区域分布同岩关组。

臭牛沟组:为浅海相砂岩、页岩及灰岩组合,剖面中可见50 m以上的炭质页岩,见于华北板块西侧的祁连海槽,限于青东北、甘中南、宁中南一带。

草凉驿群:沿秦岭一线可见厚近百米的粉砂岩、粉砂质页岩、钙质页岩、煤层等煤系页岩,见于陕南、豫南。

滴水泉组与巴塔玛依内山组:前者为黄褐色砂岩、粉砂岩、凝灰岩、炭质页岩及煤层,后者为砂砾岩、粉砂岩、炭质页岩互层夹煤线,两者均为出现在南准噶尔地区的陆相沉积,剖面厚度均超1 000 m。北准噶尔地区对应的地层分别为灰绿、灰黑色粉砂质页岩、凝灰粉砂质页岩、粉细砂岩的滨浅海相姜巴斯套组和炭质泥质粉砂岩、粉砂质页岩、粉细砂岩、灰岩、硅质页岩等海陆过渡相那仁喀拉组。南天山和塔里木盆地对应地层分别为野云沟组与和什拉甫组浅海相灰岩、粉砂岩、页岩。

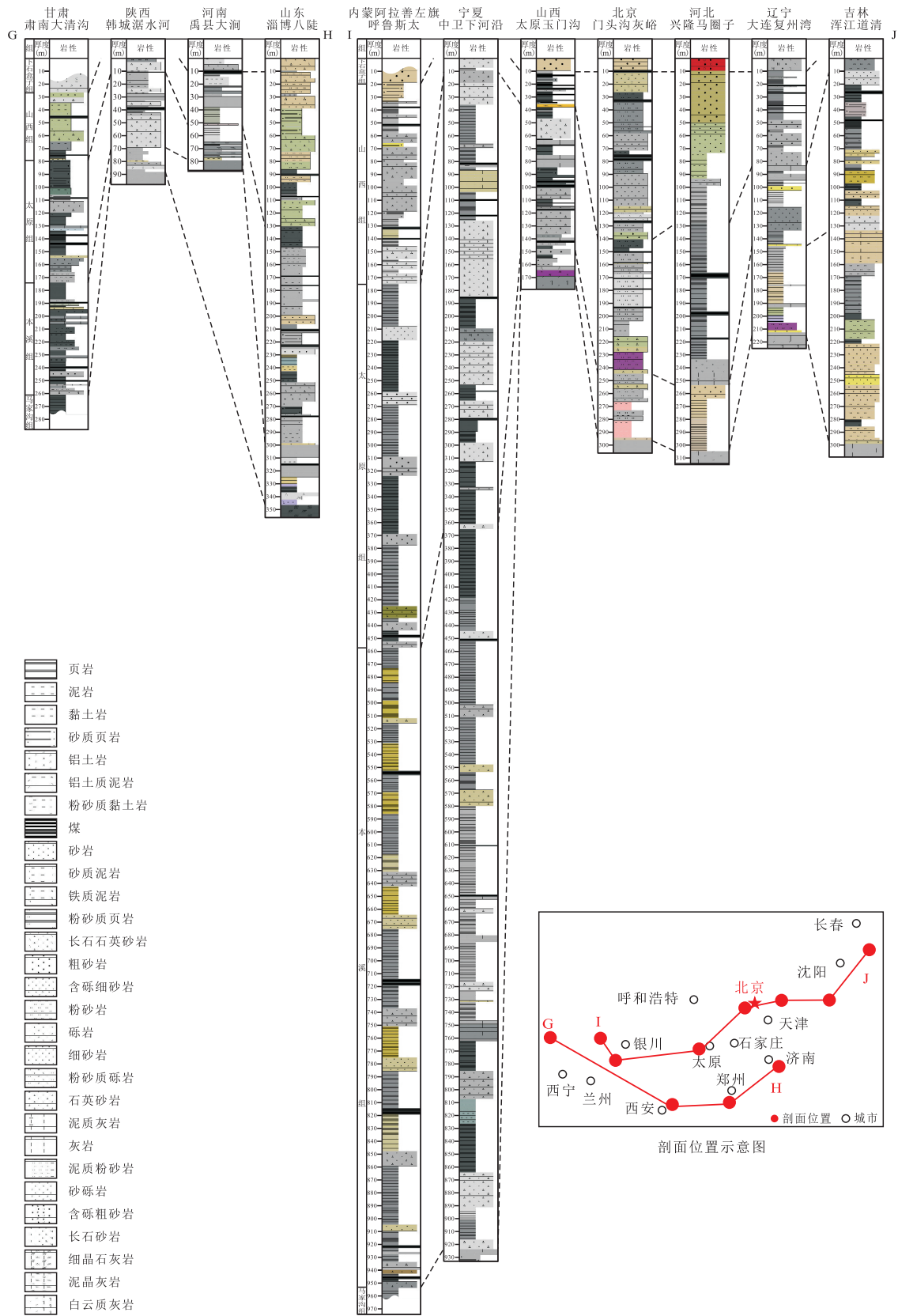
#### 2) 中石炭统

靖远组和羊虎沟组:岩性主要为海陆过渡相深灰色、黑色页岩、炭质页岩、钙质页岩、砂质页岩,夹薄层状细砂岩、透镜状灰岩和煤线。两套地层岩性相似、整合接触、连续分布,厚度超过400 m,见于陕、甘、宁地区。

弧形梁组:为黄绿色、灰黑色砂岩、粉砂质页岩、炭质页岩、粉砂岩、钙质页岩及煤线,剖面地层厚介于200~480 m,为南准噶尔地区发育的陆相页岩地层。塔里木盆地地区对应为海相地层卡拉乌依组和阿孜干组。前者为灰绿色和灰黑色灰岩、粉砂岩、泥岩、炭质页岩,后者为灰黑色灰岩、炭质页岩、泥岩、粉砂岩。

#### 3) 上石炭统

本溪组:为黄绿、黄、紫等杂色页岩、砂岩、灰岩、炭质页岩及煤层,其中的页岩厚度介于15~20 m(图3)。其底部为铁质、泥质、铝土质及灰岩砾石等风化壳物质,可见鸡窝状铁矿层、铝土页岩和铝土矿层,形成于浅海至滨岸沼泽环境。分布于辽、冀、鲁、豫、晋、陕等华北板块区。



注：柱状图的编制以相关省份区域地质等资料为基础。

图3 华北板块上石炭统(本溪组)至下(太原组)、中二叠统(山西组)野外剖面对比柱状图

Fig. 3 Stratigraphic comparison columns of shale sections for Upper Carboniferous (Benxi Formation) to Lower Permian (Taiyuan Formation) and Middle Permian (Shanxi Formation) in North China Plate

克鲁克组:为半深湖相、沼泽相灰绿、灰黑、黑色砂岩、粉砂岩、泥灰岩、灰岩、粉砂质页岩、炭质页岩及煤层,局部见菱铁矿结核层,厚度超150 m<sup>[11]</sup>,剖面见于准噶尔—吐哈—柴达木盆地及周缘沿线。

### 2.4.3 二叠系

#### 1) 下二叠统

太原组:主要为灰、灰黑色砂岩、页岩、炭质页岩夹煤层、灰岩和局部泥灰岩,含煤3~15层,产大量植物化石,顶部含铁质结核。地层分布稳定,厚约100 m,黑色页岩、钙质页岩或炭质页岩夹煤层累积厚度一般为50 m,沉积于三角洲、泻湖、沼泽相的广覆式海陆过渡相环境,分布范围略大于本溪组。

梁山组:为一套灰色、黑色页岩、炭质页岩、砂岩、硅质岩、煤层组合,含铝土矿、菱铁矿、赤铁矿。典型地层见于贵州,通常作为栖霞组下部地层而广泛见于南方地区。

风城组:主要为黑灰色白云质页岩、凝灰质页岩、凝灰质碳酸盐岩与凝灰岩等,剖面厚度可达1400 m,为咸化湖盆条件下的半深湖相、扇三角洲相沉积,见于准噶尔盆地南缘、东缘至吐哈盆地一线。

#### 2) 中二叠统

山西组:主要为粉砂岩、中细砂岩、页岩及4~9套煤层,或可表现为灰色石英砂岩与页岩的互层,含钙质结核,剖面中炭质页岩厚度超过60 m,为湖沼相沉积,其分布同太原组。

孤峰组/茅口组:为深灰、褐黄、紫灰、黑色页岩、粉砂质页岩、钙质页岩、炭质页岩、硅质页岩、含铁锰质硅质岩及粉砂岩,夹含锰页岩、含锰灰岩,见富磷结核、锰土矿及含锰灰岩。也被称为文孤峰组、笔山组、茅口组、当冲组、鸣山组等,可分为深海陆棚硅质岩型(孤峰组)和浅海陆棚碳酸盐岩型(茅口组)。前者见于苏、皖、赣、湘、粤等地区,后者见于鄂、渝、川、桂、滇等地区。

下乌尔禾组群:主要为陆相灰绿、灰色砾岩与砂岩、粉砂岩、黑色页岩互层,包括了芦苇沟(组)及其上覆的红雁池(组)。前者为灰绿色、黑色砂岩、砂质页岩、页岩、油页岩和炭质页岩组合,夹灰黑色薄层沥青质页岩和白云质灰岩;后者为灰绿色细砂岩、钙质砂岩、页岩,夹灰黑、黑色页岩、泥灰岩及薄层灰岩。两者厚度均超600 m,见于准噶尔、吐哈盆地沿线及其周缘。

#### 3) 上二叠统

龙潭组/吴家坪组:为一套海陆过渡相煤系页岩,为灰白、褐黄、灰黄、灰黑、黑色砂岩、粉砂岩、粉砂质页岩、炭质页岩、煤层,含菱铁矿薄层及结核。页岩以桂、粤、皖、苏等地为佳,厚度为100 m,同期异相地层为灰黑、灰色含燧石结核或条带的生物碎屑灰岩,见于滇、黔、川、陕、鄂、湘、皖、苏、浙、闽、赣、桂、黔、粤等地区(图4),也称吴家坪组、礼贤组、翠屏山组、乐平组、合山组等。

大隆组/长兴组:为一套海陆过渡相硅质碎屑岩组合,由灰、灰黑色为主的薄层硅质岩、硅质页岩、硅质灰岩、粉砂质页岩、钙质页岩、黑色页岩、炭质页岩组成,夹薄层煤层,偶见碳酸锰矿,地层分布与龙潭组基本一致,厚度为100 m。同期异相沉积为长兴组,为泥灰岩、硅质泥岩夹粉砂岩、页岩、硅质岩及灰岩夹硅质岩、硅质页岩。

石盒子组:主要为黄绿、灰黄及杂色砂岩、粉砂岩、泥岩、泥灰岩、铝土质页岩、粉砂质页岩、泥质页岩、炭质页岩及煤层,为河流相、深—浅湖相沉积,向上颜色变浅,可至紫红色,分布同山西组。

### 2.5 中生界和新生界

进入中生代以后,中国板块格局发生重大调整 and 变化,区域性沉积和连续性页岩分布的沉积格局被彻底打破,从而开始以盆地约束的局限制性分隔沉积。在各盆地中,沉积体系约束了页岩的类型和分布,形成了互不连通、各自发育、差异显著的页岩特点。从三叠纪到新近纪,沉降—沉积中心由南向北、由西向东迂回迁移,在大型盆地区内形成了以湖盆、三角洲相为主、单层厚度较大的粉砂质页岩、钙质页岩、云质页岩与砂岩、碳酸盐岩等互层沉积。在中小型盆地内形成了以浅湖相、扇三角洲相、沼泽相为主、连续厚度较大的砂岩、粉砂质页岩、钙质页岩、炭质页岩及煤层等。

早三叠世,海水再次沿广西、湖南一线北侵,在广大的南方地区形成了蒸发台地相沉积。中三叠世,华北、华南、塔里木板块均不断向西倾斜并在板块区的西侧形成页岩沉积,沿近南北向延伸的楚雄、四川、鄂尔多斯一线分别形成海相和陆相的普家村组、须家河组、延长组等页岩。

侏罗纪,海水全部退出。沿滇、川、陕、蒙等南北向和新、青、甘、蒙、宁、陕、晋、冀、辽等近东西向区域

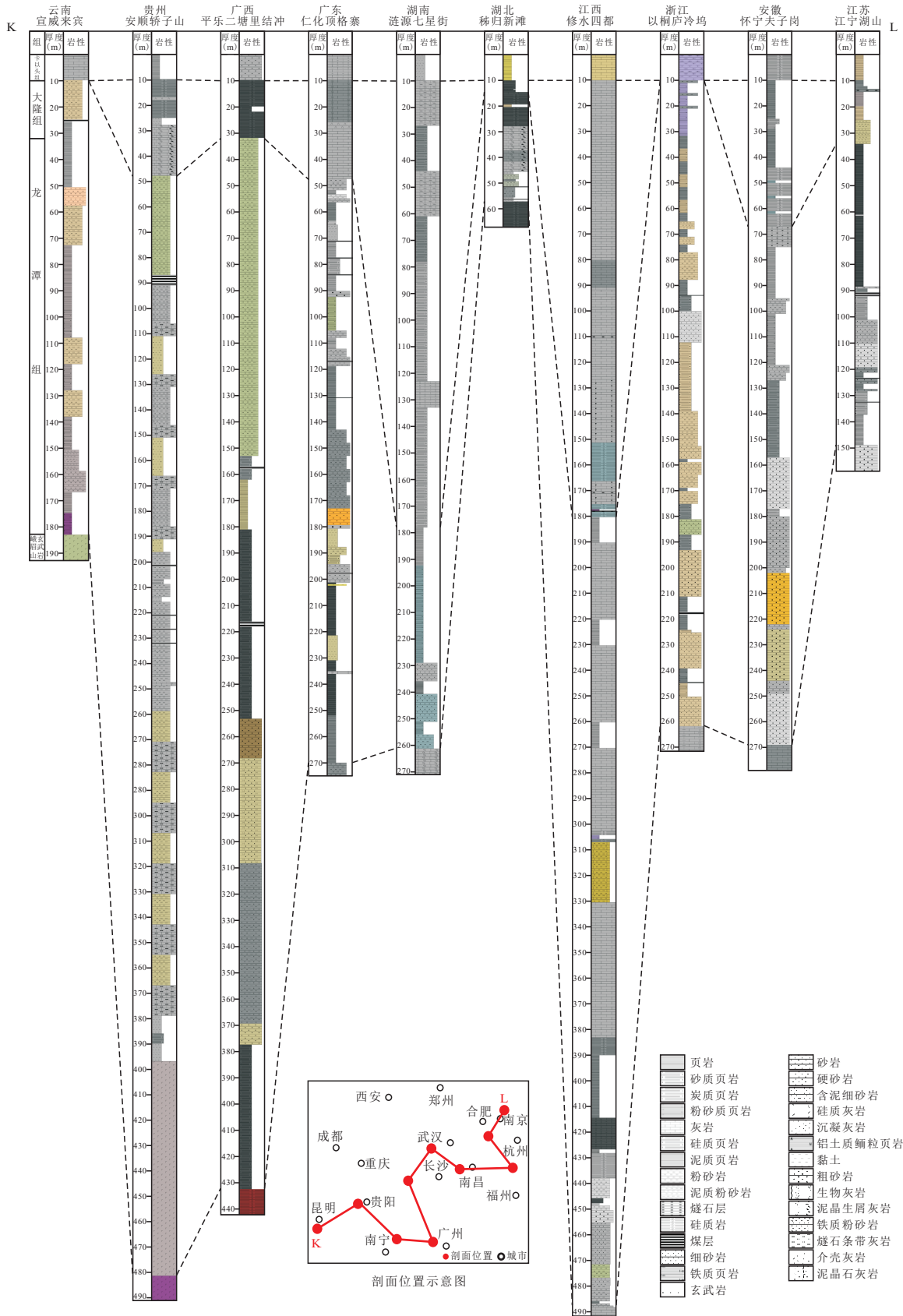


图4 华南板块区上二叠统(龙潭组和上二叠统)野外剖面对比柱状图

Fig. 4 Stratigraphic comparison columns of shale sections for Upper Permian (Longtan and Dalong Formations) in South China plate

沉积了山间盆地条件下以滨浅湖—(扇)三角洲相为主、以煤层发育为特点的页岩。柴达木盆地北缘下侏罗统的小煤沟组、中侏罗统的大煤沟组湖沼相页岩平均厚度为400 m。准噶尔、吐哈、焉耆盆地侏罗系发育了厚层页岩,下侏罗统的八道湾组和中侏罗统的西山窑组深湖、半深湖、扇三角洲及沼泽相页岩厚度各自超过千米。

白垩纪火山活动开始广泛化,页岩沉降—沉积中心逐渐向东转移,并在断陷湖盆中形成页岩。额济纳旗银根盆地下白垩统的苏红图组和八音戈壁组为一套半深湖—浅湖相黑色页岩和白云质页岩,最大厚度均过千米。松辽盆地白垩系的青山口组、嫩江组等页岩,是目前页岩油勘探的重点目标。

古近纪则以断陷深湖盆沉积为基本特点,在断陷盆地中形成面积虽小但厚度巨大的页岩。渤海湾盆地古新统的沙河街组、准噶尔盆地始新世的安吉海河组、柴达木盆地渐新统下干柴沟组、中新统上干柴沟组、上新统狮子沟组、第四系七个泉组地层厚度均在600 m以上,湖相页岩或炭质页岩占地层总厚的70%。其中,沙河街组是目前渤海湾盆地内页岩油勘探的重点领域。

由于形成时代较新,构造保存条件好,中、新生代盆地内部页岩层系的野外露头相对较少,所形成的页岩剖面多见于现今盆地的周缘或大型盆地内部的断、隆、褶皱带上。由于有机质热演化程度较低,页岩多处于生液态烃状态,大型、较大型盆地的页岩剖面中多可见油页岩,中小型盆地的页岩剖面常可见煤层或煤线。盆地内部及周缘抬褶区的页岩露头受盆地内页岩发育层系控制,三叠系页岩露头主要沿楚雄、四川、鄂尔多斯盆地及其周缘一线分布,侏罗和白垩系页岩露头主要沿伊宁、焉耆、吐哈、额济纳旗银根、二连、阜新盆地及其周缘一线分布,新生代页岩剖面则较少。

### 3 页岩剖面分布

#### 1) 不同时代中的页岩分布

我国不同地区均有页岩发育(图5),其分布与古板块构造运动密切相关。中、上元古界页岩在华北、华南、塔里木板块均有分布,多首先出现于板块的边缘部位。华北板块未变质的黑色页岩最早见于长城纪的常州沟组,成套的中元古界页岩出现在串岭沟

组和洪水庄组,见于华北板块东北缘之京、津、冀、辽、晋地区。华南板块未变质的最早成套页岩(大塘组)见于中、上扬子板块东南缘的黔东、桂北、渝东南、湘西、鄂南一带。塔里木板块未变质的最早成套页岩(照壁山组)见于板块北缘的库鲁克塔格地区。这些早期的页岩组或沉积于滨浅海的潮间、潮下带,或形成于陆相或海相间冰期,随后逐渐向浅海陆棚相页岩转变。

下古生界页岩主要分布在华南板块、塔里木板块及其周缘,在华北板块东南缘也有小面积的早期页岩分布。该时期沉积的页岩呈广覆式分布,主要受控于古地形和古海槽,沉积厚层状页岩。陆棚相海水经历了从深到浅的变化,下部地层硅质含量高,炭质页岩、硅质页岩、锰质页岩等硬度大,颜色黑,发育黄铁矿、菱铁矿、硅质(或燧石)及碳酸盐等类型结核,常含锰、钒、镍、钴等多金属硫化物。上部地层页岩中的外源碎屑含量增加,灰岩及粉砂岩夹层含量增多,粉砂质页岩、钙质页岩及炭质页岩等颜色偏浅易风化,是页岩的主要类型。

上古生界页岩以海水流动不畅的海槽、半封闭海湾相或三角洲、泻湖、潮坪相等海陆过渡相环境为主,在我国分布最广。页岩分布相对集中但空间、厚度及岩性等变化较大,主要受控于古海槽的分布和形态,见于南方地区,其次是塔里木板块及其周缘,在华北板块也有短时间的沉积,但从晚二叠世起转变为陆相。所形成的页岩以炭质页岩、粉砂质页岩、钙质页岩为主,多含煤层和灰岩,构成特殊的砂岩、页岩、泥岩、煤层、灰岩等岩性变化序列。

中、新生界页岩以陆相为主,各板块中均有分布。页岩的分布受盆地约束,页岩主要形成于湖盆、(扇)三角洲、沼泽等环境。中生代页岩主要分布在大中型盆地内或板块边缘的中小型盆地中,新生界页岩主要发育在华北板块的东、西两侧。在中小型盆地中,粉砂质页岩、炭质页岩等多与砂岩、泥岩、煤层等形成韵律组合。在大中型盆地中,粉砂质页岩、钙质页岩等可与灰岩、云岩互层。

#### 2) 不同板块中的页岩分布

华北板块的页岩形成与分布表现为明显的3个阶段。第一阶段主要为发育在华北板块东北缘的中上元古界滨浅海(潮下带)、泻湖、海湾或浅海陆棚相页岩,主要岩性为厚层—薄层状黑色炭质页岩、粉砂质页岩与深灰色、灰绿色、灰白色粉砂岩、细砂岩、白

云岩等,发育碳酸盐、黄铁矿、菱铁矿、硅质(或燧石)及锰质等多种结核,常有辉绿岩侵入其中。在华北板块东南缘,发育有含磷结核的下寒武统炭质页岩;第二阶段为经过长期剥蚀后的晚石炭世—早二叠世海陆过渡相和陆相页岩沉积,浅海、三角洲相、泻湖、滨岸沼泽相炭质页岩、粉砂质页岩、钙质页岩与砂岩、泥岩、灰岩及煤层互层,广覆于华北地台之上,底部常见铝土矿,顶部常含铁质结核。中二叠世页岩

形成于湖沼相,除沉积相区别外,其区域分布和岩性变化特点同晚石炭世—早二叠世;第三阶段开始于晚三叠世,沉积于深湖、半深湖、(扇)三角洲及沼泽相的页岩累积厚度大但陆相湖盆分割性强,以粉砂质页岩、钙质页岩、炭质页岩为主,可与泥岩、砂岩、碳酸盐岩、煤层互层,常可表现为油页岩。

华南板块页岩形成与分布表现为基本连续发生但不断迁移的4个阶段。第一阶段为南华纪陆相和

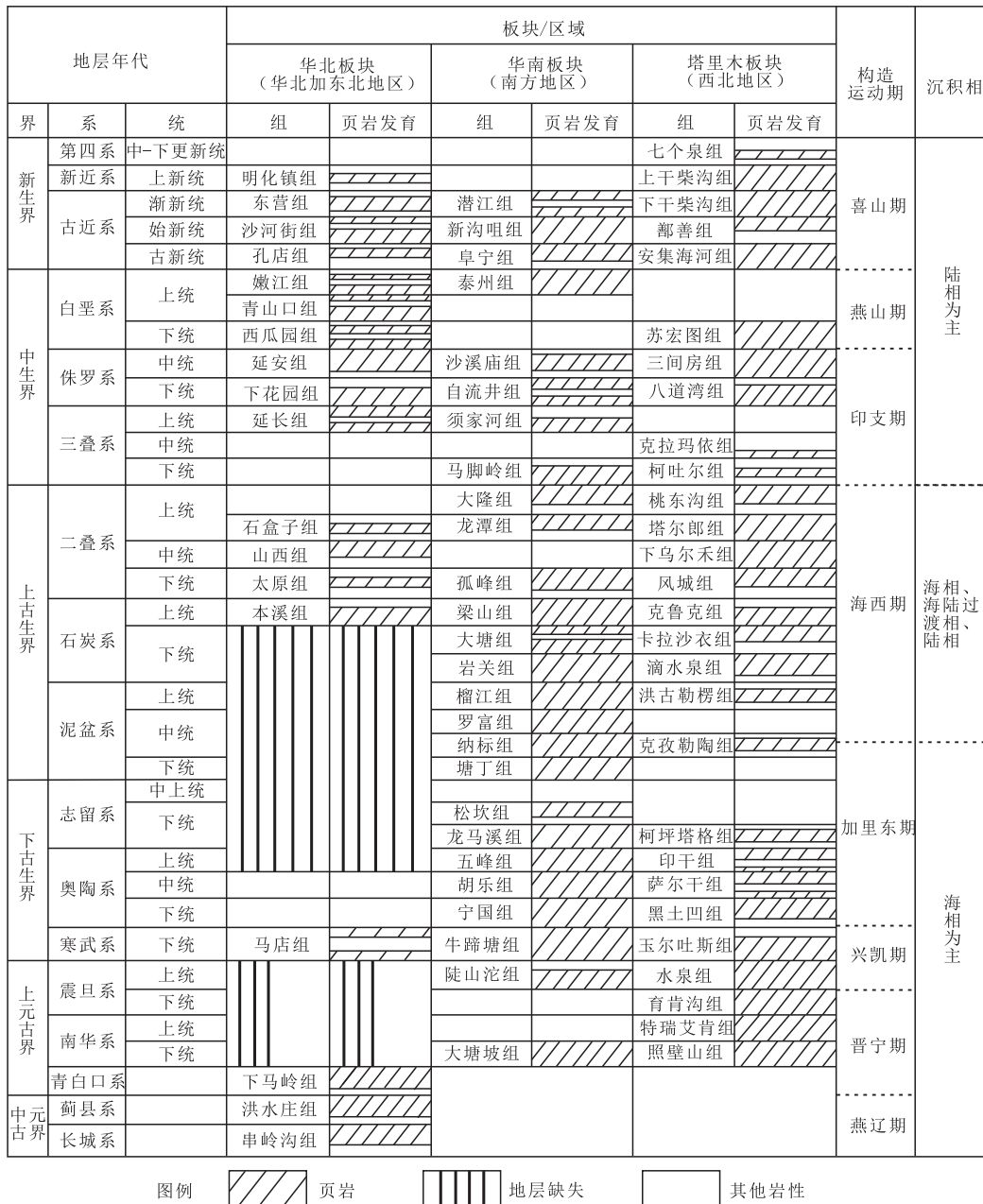


图5 中国主要页岩地层分布  
Fig. 5 Distribution of major shale formations in China

海相间冰期,沉积页岩主要为炭质页岩、粉砂质页岩及锰质页岩,地层含锰特征明显,主要见于黔、桂、渝、湘、鄂一带;第二阶段开始于晚震旦世止于晚志留世,以深海陆棚、浅海陆棚及海湾相等开阔一半封闭环境为主,为砂岩、泥灰岩、碳酸盐岩、硅质岩与炭质页岩、粉砂质页岩、钙质页岩、泥质、硅质岩等互层,以含硅、磷、炭、黄铁矿结核及锰、镍、钒、钴、银等多金属硫化物为特点,可夹磷矿层或锰矿层;第三阶段始于早泥盆世止于早侏罗世,主要为浅海陆棚、局限海台地、局限海湾相、台盆相、滨浅海相、沼泽相环境,地层主要为灰岩、泥灰岩、生屑灰岩、砂岩、粉砂岩、砂质页岩、粉砂质页岩、炭质页岩、钙质页岩,局部深海陆棚处可见硅质岩和硅质页岩,煤层层数和累计厚度向上增加;第四阶段从海水退出、陆相页岩沉积开始算起,海水退出的时间在各地略有差异,但最晚不迟于中侏罗世。该阶段以陆相湖盆、三角洲、沼泽页岩为主,岩性为灰绿、灰黑色泥页岩、粉砂质页岩、炭质页岩、砂岩、灰岩、煤层等。

塔里木板块的页岩形成与分布可分为3个阶段。第一阶段为中元古界的海相和陆相间冰期页岩,可见页岩、粉砂质页岩、钙质页岩、泥灰岩、灰岩、硅质岩及冰碛砾岩等;第二阶段从早寒武世开始至早石炭世,地层为浅海相的灰岩、砂岩、粉砂岩、硅质岩及页岩。其早期沉积特点同华南板块,晚期可出现凝灰岩和煤层;第三阶段大约从中石炭世开始,页岩以陆相粉砂岩、炭质页岩及煤层发育为基本特点。

### 3) 不同类型页岩分布及剖面特点

主要根据其成分特点,页岩剖面可分为锰质型、硅质型、灰云质型、粉砂质型、炭质型、煤质型及混合型7种。

**硅质型:**以灰黑、黑色硅质岩、硅质页岩等为主,常含磷、硅、铁及云质结核,多为广海陆棚相沉积。页岩样品密度大、硬度大,页岩剖面抗物理风化能力强,广泛见于南方地区。

**锰质型:**以磷质和锰、镍、钼、钒等多金属硫化物共存为特点,可见锰结核或锰矿层、磷矿层、锰质硅质岩等,多见于南方地区中二叠统及更老地层中。页岩剖面抗物理风化能力较强,可自燃,多见于黔、渝、鄂、湘一带。

**灰云质型:**主要表现为钙质页岩、云质页岩,页岩中常有灰、灰黑色、灰白色页岩、灰岩、云岩、泥灰岩薄发育,硅质岩、硅质页岩及磷、锰质可伴生其中,

主要形成于半封闭台地、浅海/浅海陆棚及泻湖相,也可见于深湖、半深湖相,页岩剖面抗物理风化能力较强,分布广泛。

**粉砂质型:**主要为黑色粉砂质页岩、炭质页岩、炭质粉砂质页岩、粉砂岩及细砂岩等,常可含铁质结核或菱锰矿,可见于冰碛、浅海陆棚及深湖相等环境中。剖面页岩中的碳酸盐岩含量偏低,页岩抗物理风化能力较弱,易风化为灰黑色、灰绿色、土黄色、紫灰色黄土,形成低丘至沟壑地形。

**炭质型:**以高含碳为主要特点,可见于各种沉积环境中,单层厚度一般较小,抗风化能力弱,易遭受剥蚀。

**煤质型:**主要为煤层或煤线、炭质页岩、粉砂质页岩等,多形成于海陆过渡相(三角洲、潮坪、泻湖等)或中小型盆地中(扇三角洲、沼泽、滨浅湖等)中,该类型页岩剖面易受风化剥蚀,残缺不全。

**混合型:**2种或2种以上类型页岩在同一条剖面中的同时出现。

从长城纪开始,华北、华南、塔里木三大板块的海相页岩沉积一直可以延续到早侏罗世。其中,主要沉积于中晚元古代和早古生代早期的部分页岩以广海相环境为主,主要形成硅质、锰质、钙质、炭质及混合型页岩,剖面较为完整。牛蹄塘组是该时期页岩的典型代表,新鲜或较新鲜剖面易污手,见栉阶构造,常表现为黑色页岩表面被铁锈色、棕黄色、白色等沉淀物覆盖,呈斑驳陆离色,落屑物较少且多为块状或板状。短期风化剖面较为陡峭突兀,剖面内常可见小型至大型或超大型圆球状、飞碟状、椭球状磷质、硅质或钙质结核,页岩裸露时可见石煤、沥青、油页岩或气苗,或被草本植物覆盖。长期风化剖面呈丘状,表面可见薄层黄土(风化产物)覆盖,上覆草本或灌木植被。

早古生代晚期页岩多形成于浅海陆棚相、封闭一半封闭海湾相或半深海相,外源物屑及粉砂质含量较高,常与碳酸盐岩互层或过渡,形成炭质、粉砂质、硅质及混合型页岩。五峰组—龙马溪组页岩是该时期的代表,其新鲜风化剖面常见灰色调的尖棱条状、鱼棱状、尖棱状落屑。短期风化剖面见球形风化,页岩剖面多为土黄色、黄绿色、浅紫色、棕黄色、棕灰色及灰白色。长期风化后产生黄土层,风化地形以平缓丘陵或沟谷为主,发育灌木、乔木植被,多被开垦为良田。

晚古生代早期,页岩主要发育在华南和塔里木板块及其周缘,主要沉积于浅海相、局限浅海陆棚—局限海台地相、海槽相、滨浅海相,外源粉砂质物屑含量进一步增加,形成与碳酸盐岩互层或同期异相的多种类型页岩,包括炭质、硅质、钙质、粉砂质及混合型页岩,局部出现锰质型页岩。页岩剖面抗风化能力差异较大,风化后以黑灰、灰绿、灰黄、土黄、灰白等色调为主,剖面地形多样,从低丘至沟壑均可发现,植被覆盖较好。

晚古生代晚期,页岩主要形成于滨浅海、滨岸沼泽、泻湖、潮坪、三角洲相等海陆过渡相环境中,末期也形成于湖相、(扇)三角洲相、沼泽相,主要形成炭质、煤质、粉砂质、钙质、硅质及混合型页岩,可见油页岩或沥青。页岩剖面极易风化,连续性差。新鲜时呈黑灰色,风化物落屑多且呈杂乱堆积的松散状,常见典型书页状,易粉化。短期风化后,页岩表面呈特殊的棕红、土黄、灰白、灰黑等斑驳色。剖面常被夷平直至形成沟谷,其上各种植被发育。

中、新生代主要为陆相页岩剖面,页岩主要形成于中小型盆地的滨浅湖、扇三角洲、沼泽等环境和大中型盆地的深湖、半深湖、三角洲等环境,可形成灰云质、粉砂质、煤质及混合型页岩。页岩剖面易受风化剥蚀,残缺不全,风化后多呈棕黄色,地形以低丘至沟谷为主,其上多种植被发育,可见煤层、油砂、页岩油及油气苗等。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

#### 1) 海槽与海相页岩分布

页岩的形成和分布受多种因素影响,全球周期性气候变化、古板块构造运动以及母源物质供应等均对不同时期和类型的页岩产生了控制作用。其中,海槽对页岩的形成产生了明显的约束作用。华北板块的燕辽海槽控制了中、上元古界页岩分布于京、津、冀、辽,祁连海槽限制了下石炭统臭牛沟组页岩主要分布在青、甘、宁、蒙一带;华南板块的扬子海槽控制了寒武统和上奥陶统一志留统页岩主要沿扬子板块分布,华南海槽限制了泥盆系页岩主要分布在滇、黔、桂、湘、鄂、赣一带。

#### 2) 页岩剖面与页岩变质作用

页岩剖面多分布在区域抬隆区、构造褶皱区、复

杂活动区及盆地内断隆区,与不均一的块断抬升或断层活动有关。页岩剖面的抗风化能力整体较差,其隆升背景、构造活动、岩性组合、矿物成分及气候条件等原因均可对页岩剖面保存的完整性产生影响。

板块边缘、褶皱带及过渡区同时也是变质作用的高发区,区域构造运动和应力集中加速了页岩的区域变质作用。前志留纪页岩在不同地区发生了程度不等的变质作用,包括板岩化微变质作用、千枚岩化和绢云母化轻变质作用。这些变质作用常发生在板块边缘、褶皱带或过渡带。在华南板块区,赣中南、粤西南、湘中南、滇西南、皖南、川西、川西北、川东北、渝东北、鄂北及鄂西等地易于发生变质作用。变质作用强度与页岩沉积时代并没有直接关系,洪水庄组和下马岭组页岩虽然时代久远,但目前大家所认同的有机质热演化程度只有0.5%~1.2%(表1)。

#### 3) 页岩气地质意义

中、上元古界页岩在华北、华南、塔里木板块均有分布,主要形成于滨海至浅海陆棚相,部分为海相或陆相间冰期产物。地层发育时代早、分布在板块边缘、冰碛成因、地层含锰、华南板块局部变质、华北板块热演化成熟度相对偏低是其主要特点。页岩干酪根为生气能力强的I-II<sub>1</sub>型,有机质丰度、脆性矿物含量及基质孔隙度等参数变化较大,但整体数值相对偏高,具有明确的页岩气地质意义。目前多处见古油藏遗迹,华北板块的洪水庄组和下马岭组,华南板块的大塘坡组和陡山沱组,塔里木板块的照壁山组、特瑞艾肯组、育肯沟组、水泉组等,均值得作为潜在的页岩气目标层系进行系统地探索研究。

下古生界海相页岩具有广海与浅海陆棚沉积、厚层状连续发育、区域性连片分布、高硅含磷见石煤、多种结核和金属硫化物、颜色黑、硬度大或球形风化厚度大、边缘区域局部变质等特点,板块区页岩气成藏条件好。页岩有机质为I-II<sub>1</sub>型,生气能力强,丰度变化较大,有机质热演化成熟度和孔隙度明显较高,脆性矿物含量显著减少。是我国目前页岩气勘探发现及开发的主要目的层系。华北板块的马店组,华南板块的牛蹄塘组、宁国组、胡乐组,塔里木板块的玉尔吐斯组至柯坪塔格组等页岩,均具有良好的页岩气地质条件。

上古生界页岩在我国具有最广泛的分布,以过渡相为特色的多种沉积环境、以煤质型为特点的多

表1 部分页岩层系主要评价参数对比  
Table 1 Comparison of main evaluation parameters of partial shale strata

统/系	地层组	地区	沉积相	有机质类型	有机质丰度 (%)	成熟度 (%)	脆性矿物含量 (%)	孔隙度 (%)	数据来源参考文献
渐新统	东营	华北	陆相	II <sub>1</sub> 、II <sub>2</sub>	(0.5~15)/1.4	0.2~1.5	43.2~89	5	[12-14]
始新统	沙河街	华北	陆相	各型均有	0.5~27.3	0.4~3	36	3~8	[15-17]
下侏罗统	八道湾	西北	陆相	各型均有	(0.8~38.8)/8.7	0.8~1.1	(38~76)/54	1.9~12.3	[18-20]
上三叠统	延长	华北	陆相	I-II	(0.5~30)/10	0.6~1.3	(29~56.4)/44	(5.6~15.6)/10.2	[21-23]
中二叠统	芦草沟	西北	陆相	各型均有	3.6	0.7~1	92	5.5~19.8	[24-26]
中二叠统	山西	华北	陆相	III	(0~30.8)/(1.2~2.5)	0.6~4.5	37~52	0.9~7	[27-28]
上二叠统	大隆	南方	海陆过渡相	各型均有	(0.3~14.7)/(3~6)	1.1~2.6	(28~93)/(56~77)	(0.4~8.4)/2.6	[28-30]
上二叠统	龙潭	南方	海陆过渡相	III型,少量II <sub>2</sub>	(0.4~18.4)/(3.2~5.7)	1.1~3.2	(9~94)/(50~66)	0.5~12.6	[28-29,31]
下二叠统	太原	华北	海陆过渡相	III	(0.1~8)/(2~3)	0.7~4.1	39~47	1.7~4.8	[27]
上奥陶、下志留统	五峰和龙马溪	南方	浅海—半深海	I-II <sub>1</sub>	(0.4~25.7)/2.6	1.6~3.6	≥60	4~5.3	[31-34]
中奥陶统	萨尔干	西北	海湾相	I-II	(0.6~5.7)/2.7	1.2~4.6	62~83	(0.1~21.7)/7.8	[15,35-36]
下寒武统	玉尔吐斯	西北	浅海陆棚	I-II	4~26	1.2~5.0	≥50		[15,37-39]
下寒武统	牛蹄塘	南方	广海陆棚相	I-II <sub>1</sub>	(0.3~15.8)/3	≥2~3	≥60	1.5~3.7	[33,40-41]
下寒武	马店组	华北	陆表海	I	0.7~26.4	2.8~4.6		3.1~6.2	[8]
上震旦统	陡山沱	南方	广海陆棚	I-II <sub>1</sub>	(0.6~17.1)/3.4	1.6~3.5	(78~94.6)/84.8	(1.1~12.5)/3.6	[42-44]
下南华统	大塘坡	南方	冰川间冰期	I	(0~10)/(2~4)	≥2	43	5	[45-47]
青白口系	下马岭	华北	滨岸—浅海陆棚	I-II <sub>1</sub>	(0.1~20)/3	0.5~1	(59.3~66.2)/62.3	(2.1~5.4)/3.7	[42,48-51]
蓟县系	洪水庄	华北	浅海陆棚	I-II <sub>1</sub>	(0.5~7.6)/4.2	0.8~1	(55.3~76.9)/59.6	(0.6~1.9)/1.3	[50-51]
长城系	串岭沟	华北	滨海—浅海	I	(0.1~2.2)/0.8	1.54~3.01/2.03	52.2~61.6	4.8	[42,52]

注:表中数据为范围/平均值。

种页岩类型、页岩分布空间连续性差、砂岩—泥岩—页岩—煤层—灰岩韵律递变、易于风化剥蚀等,是这一时期页岩的主要特点。页岩干酪根以III型为主,有机质丰度和基质孔隙度变化较大,有机质热演化成熟度中等偏高,脆性矿物含量低,页岩气地质条件变化快。目前已在多处发现页岩气显示。华北板块的臭牛沟组、靖远组、羊虎沟组、本溪组、太原组、山西组等,华南板块的塘丁组、纳标组、罗富组、岩关组、大塘组、梁山组、孤峰组、龙潭组、大隆组等,塔里木板块的滴水泉组、巴塔玛依内山组、弧形梁组、克鲁克组、风城组、下乌尔禾组等页岩,均值得引起重视。

中、新生代以陆相为主的页岩主要见于近似南北向的滇、川、陕一线和大约东西向的新一陕—黑地区,具有盆地控制页岩沉积、页岩厚度大、分隔性强、

有机质类型多样、丰度变化大,热演化成熟度普遍偏低等特点。页岩脆性矿物含量中等偏低,孔隙度普遍偏好,可同时形成页岩油气,目前是我国页岩油勘探开发的主要目标。各板块及地区的中生界、华北板块的新生界值得重点关注。

#### 4.2 结论

1) 我国页岩发育在时间上延绵不断,各板块页岩发育具有明显的阶段性,各时代页岩地质特点明显。中、上元古界以海相为主兼有陆相,发育滨浅海至浅海陆棚相、海相和陆相冰碛页岩。下古生界页岩以海相为主,发育广海陆棚相至浅海陆棚相页岩。上古生界页岩以海陆过渡相为主,兼有不同程度的海相和陆相页岩发育。中、新生界页岩类型多样但以陆相为主。

2) 不同时代页岩分布受板块控制明显,不同板块和地区页岩分布各有特色。中、上元古界页岩以见于不同古板块的边缘为特点,下古生界页岩主要分布在华南和塔里木板块内部,上古生界页岩分布范围最广,中生界页岩主要沿近南北向的滇、川、陕和近东西向的新一陕—黑—一线分布,新生界页岩主要发育在华北板块的东、西两侧。

3) 页岩剖面可分为锰质、硅质、灰云质、粉砂质、炭质、煤质及混合型7种,每种页岩剖面中均可有炭质型出现。不同页岩类型各具有不同的时代性和地域性分布特点,各具有不同的沉积、时代、剖面、分布及页岩气地质意义。其中,锰质型页岩主要见于南方地区中二叠统及更老地层中,硅质型页岩主要见于广海陆棚相,煤质型页岩发育时代较晚且主要见于海陆过渡相和陆相,粉砂质和灰云质型分布广泛。

4) 页岩的整体抗风化能力较弱,不同时代和地区的页岩剖面发育受多种因素影响,海槽对页岩沉积产生了重要的控制作用,板块边缘、褶皱带及复杂构造活动区既是页岩沉积的有利区,也是变质作用发生和页岩剖面出露的多发区。各地区不同时代的页岩剖面各具特色,对页岩气具有特殊的指示意义。

致谢:撰文及编图过程中参考了不同省份的区域地质志资料,得到了许多专家的大力支持,谨以致谢。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国地质矿产部.地质专报一区域地质(第1-5、第7-11、第13-33号)[M].北京:地质出版社,1982-1989.  
Ministry of Geology and Mineral Resources of People's Republic of China. Geological bulletin-regional geography (Number 1-5, Number 7-11, Number 13-33) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982-1989.
- [2] 中国地质调查局.中国区域地质志[M].北京:地质出版社,2017.  
China Geological Survey. Regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [3] 孙会一,高林志,包创,等.河北宽城中元古代串岭沟组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质学报,2013,87(4):591-596.  
SUN Huiyi, GAO Linzhi, BAO Chuang, et al. SHRIMP Zircon U-Pb of Mesoproterozoic Chuanlinggou Formation from Kuancheng County in Hebei Province and its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(4): 591-596.
- [4] 朱光有,闫慧慧,陈玮岩,等.塔里木盆地东部南华系—寒武系黑色岩系地球化学特征及形成与分布[J].岩石学报,2020,36(11):3442-3462.  
ZHU Guangyou, YAN Huihui, CHEN Weiyan, et al. Geochemical characteristics, formation and distribution of the Nanhua-Cambrian black rock series in the eastern Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(11): 3442-3462.
- [5] 熊亚平.安徽石台早寒武世黑色岩系沉积地球化学及含矿性[D].合肥:合肥工业大学,2008.  
XIONG Yaping. Sedimentary geochemistry and ore-bearing potentiality of the Early Cambrian black rock series in Shitai county, Anhui province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [6] 戴金星,刘德良,曹高社.华北陆块南部寒武统海相泥质烃源岩的发现对天然气勘探的意义[J].地质论评,2003,49(3):322-329.  
DAI Jinxing, LIU Deliang, CAO Gaoshe. Discovery of marine muddy hydrocarbon source rocks in the southern margin of the North China Block and its significance for gas exploration[J]. Geological Review, 2003, 49(3): 322-329.
- [7] 戴金星,刘德良,曹高社,等.华北盆地南缘寒武系烃源岩[M].北京:石油工业出版社,2005.  
DAI Jinxing, LIU Deliang, CAO Gaoshe. Cambrian source rocks in the southern margin of the North China Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [8] 陶士振,刘德良,李昌伟,等.华北陆块新区新层页岩气潜在勘探新领域—南华北下寒武统马店组烃源岩及其含气系统[J].天然气地球科学,2014,25(11):1767-1780.  
GAO Shizhen, LIU Deliang, LI Changwei, et al. Exploration frontiers of unexplored shale layer in New District, North China Block: Source rock and its gas system of Madian Formation of Lower Cambrian in the Southern Part of North China Block[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1767-1780.
- [9] 方少之.江苏省及邻区主要黑色页岩沉积大地构造分析与页岩气勘探前景[D].南京:南京大学,2018.  
FANG Shaozhi. The sedimentary tectonics and shale gas exploration prospects of the main dark shale formations in Jiangsu and its neighbouring area[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [10] 陈旭,王红岩,赵群,等.中国扬子区奥陶期末至志留纪初含页岩气地层[M].杭州:浙江大学出版社,2021.  
CHEN Xu, WANG Hongyan, ZHAO Qun, et al. Shale gas-bearing formations from the end of the Ordovician to the beginning of the Silurian in the Yangtze region of China[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2021.
- [11] 石冰清,黄建华,张方圆.新疆准噶尔盆地东北缘石炭系滴水泉组烃源岩评价[J].科学技术与工程,2012,12(23):5718-5722.  
SHI Bingqing, HUANG Jianhua, ZHANG Fangyuan. The opinion of carboniferous source rocks from the Dishuiquan Formation on the northeastern margin of the Junggar Basin, Xinjiang[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(23): 5718-5722.
- [12] 王广源,张金川,李晓光,等.辽河东部凹陷古近系页岩气聚集条件分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2010,25(2):1-5.  
WANG Guangyuan, ZHANG Jinchuan, LI Xiaoguang, et al.

- Accumulation conditions of the Paleogene shale gas in the eastern sag of Liaohe Depression[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition)*, 2010, 25(2): 1-5.
- [13] 徐波,李敬含,李晓革,等.辽河油田东部凹陷页岩气成藏条件及含气性评价[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 450-458.  
XU Bo, LI Jinghan, LI Xiaoge, et al. Evaluation of hydrocarbon accumulation conditions for shale gas from the Eastern Sag of the Liaohe Oilfield and its gas-bearing properties[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 450-458.
- [14] 阳宏,刘成林,王飞龙,等.渤海凹陷东营组古沉积环境及烃源岩发育模式[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(6): 81-92.  
YANG Hong, LIU Chenglin, WANG Feilong, et al. Paleoenvironment and development model of source rocks of Dongying Formation in Bozhong Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(6): 81-92.
- [15] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. *天然气工业*, 2011, 31(12): 26-39.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, et al. Formation conditions and exploration practice of shale gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12): 26-39.
- [16] 杨超,张金川,李婉君,等.辽河坳陷沙三、沙四段泥页岩微观孔隙特征及其成藏意义[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 286-294.  
YANG Chao, ZHANG Jinchuan, LI Wanjun, et al. Microscopic pore characteristics of Sha-3 and Sha-4 shale and their accumulation significance in Liaohe Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 286-294.
- [17] 张顺,陈世悦,蒲秀刚,等.断陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及储层特征——以东营凹陷沙河街组和沧东凹陷孔店组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(3): 568-581.  
ZHANG Shun, CHEN Shiyue, PU Xiugang, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai fault-depressed lacustrine basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(3): 568-581.
- [18] 曾维特,丁文龙,张金川,等.中国西北地区页岩气形成地质条件分析[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(4): 139-150.  
ZENG Weite, DING Wenlong, ZHANG Jinchuan, et al. Analysis of Geological controls on shale gas accumulation in Northwest China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(4): 139-150.
- [19] 张敏,李贤庆,张吉振,等.新疆阜康地区八道湾组煤系页岩气储层孔隙结构特征[J]. *地球化学*, 2020, 49(1): 95-107.  
ZHANG Min, LI Xianqing, ZHANG Jizhen, et al. Pore structure characteristics of a shale gas reservoir from coal measures in the Badaowan Formation, Fukang area of the Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Geochimica*, 2020, 49(1): 95-107.
- [20] 张敏,李贤庆,张吉振,等.新疆阜康地区八道湾组页岩气成藏条件[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 103-110.  
ZHANG Min, LI Xianqing, ZHANG Jizhen, et al. Reservoir-forming conditions of shale gas in Badaowan Formation in Fukang area, Xinjiang[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 103-110.
- [21] 徐士林,包书景.鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩气形成条件及有利发育区预测[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(3): 460-465.  
XU Shilin, BAO Shujing. Preliminary analysis of shale gas resource potential and favorable areas in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 460-465.
- [22] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1-11.  
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [23] 袁选俊,林森虎,刘群,等.湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34-43.  
YUAN Xuanjun, LIN Senhu, LIU Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34-43.
- [24] 卢登芳.中国典型地区页岩气地质条件对比研究[D].北京:中国地质大学,2017.  
LU Dengfang. The Comparative Analysis on Geological Conditions of Shale Gas in Typical Areas in China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [25] 郭旭光,何文军,杨森,等.准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1168-1179.  
GUO Xuguang, HE Wenjun, YANG Sen, et al. Evaluation and application of key technologies of “sweet area” of shale oil in Junggar Basin: Case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Depression[J]. *Nature Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1168-1179.
- [26] 范谭广,徐雄飞,范亮,等.三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(4): 125-136.  
FAN Tanguang, XU Xiongfei, FAN Liang, et al. Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 125-136.
- [27] 匡立春,董大忠,何文渊,等.鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 435-446.  
KUANG Lichun, DONG Dazhong, HE Wenyuan, et al. Geological characteristics and development potential of transitional shale gas in the east margin of the Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 435-446.
- [28] 翟刚毅,王玉芳,刘国恒,等.中国二叠系海陆交互相页岩气富集成藏特征及前景分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(3): 102-117.  
ZHAI Gangyi, WANG Yufang, LIU Guoheng, et al. Enrichment and accumulation characteristics and prospect analysis of the Permian marine continental multiphase shale gas in China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(3): 102-117.

- [29] 顾志翔,彭勇民,何幼斌,等.湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件[J].中国地质,2015,42(1):288-299.  
GU Zhixiang, PENG Yongmin, HE Youbin, et al. Geological conditions of Permian sea-land transitional facies shale gas in the Xiangzhong depression[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 288-299.
- [30] 包书景,林拓,聂海宽,等.海陆过渡相页岩气成藏特征初探:以湘中坳陷二叠系为例[J].地学前缘,2016,23(1):44-53.  
BAO Shujing, LIN Tuo, NIE Haikuan, et al. Preliminary study of the transitional facies shale gas reservoir characteristics: Taking Permian in the Xiangzhong depression as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 44-53.
- [31] 许露露,文剑航,温雅茹,等.中扬子鄂西地区海相页岩气地质特征及找矿成果综述[J].资源环境与工程,2021,35(5):611-624.  
XU Lulu, WEN Jianhang, WEN Yaru, et al. Geological characteristics and prospecting results of marine shale gas of western Hubei, Middle Yangtze[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(5): 611-624.
- [32] 董大忠,王玉满,黄旭楠,等.中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J].天然气地球科学,2016,27(9):1583-1601.  
DONG Dazhong, WANG Yuman, HUANG Xu'nan, et al. Discussion about geological characteristics, resource evaluation methods and its key parameters of shale gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9): 1583-1601.
- [33] 张君峰,许浩,周志,等.鄂西宜昌地区页岩气成藏地质特征[J].石油学报,2019,40(8):887-899.  
ZHANG Junfeng, XU Hao, ZHOU Zhi, et al. Geological characteristics of shale gas reservoir in Yichang area, western Hubei[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(8): 887-899.
- [34] 葛明娜,任收麦,郭天旭,等.中国南方下古生界海相页岩气“优质层段”识别方法与应用[J].岩矿测试,2020,39(3):350-361.  
GE Mingna, REN Shoumai, GUO Tianxu, et al. Identification method of marine shale gas “high-quality layer” in the lower Paleozoic area, southern China and its application[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(3): 350-361.
- [35] 乔锦琪,刘洛夫,申宝剑,等.塔里木盆地奥陶系页岩气形成条件及有利区带预测[J].新疆石油地质,2016,37(4):409-416.  
QIAO Jinqi, LIU Luofu, SHEN Baojian, et al. Formation of Ordovician shale gas and prediction of favorable zones in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(4): 409-416.
- [36] 廖晓,王震亮,余朱宇,等.塔里木盆地柯坪地区奥陶系高丰度海相烃源岩成因探讨[J].地质科技情报,2018,37(2):59-64.  
LIAO Xiao, WANG Zhenliang, YU Zhuyu, et al. Genesis of Ordovician marine source rocks of high organic abundance in Keping Region, Tarim Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(2): 59-64.
- [37] 陈强路,储呈林,杨鑫,等.塔里木盆地寒武系沉积模式与烃源岩发育[J].石油实验地质,2015,37(6):689-695.  
CHEN Qianglu, CHU Chenglin, YANG Xin, et al. Sedimentary model and development of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(6): 689-695.
- [38] 朱光有,陈斐然,陈志勇,等.塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J].天然气地球科学,2016,27(1):8-21.  
ZHU Guangyou, CHEN Feiran, CHEN Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 8-21.
- [39] 李建忠,陶小晚,白斌,等.中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J].石油勘探与开发,2021,48(1):52-67.  
LI Jianzhong, TAO Xiaowan, BAI Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 52-67.
- [40] 王玉芳,冷济高,李鹏,等.黔东北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气特征及主控因素分析[J].古地理学报,2016,18(4):605-614.  
WANG Yufang, LENG Jigao, LI Peng, et al. Characteristics and its main enrichment controlling factors of shale gas of the Lower Cambrian Niutitang Formation in northeastern Guizhou Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(4): 605-614.
- [41] 姜生玲,周庆华,蒋礼宏,等.湘西北HY1井下寒武统牛蹄塘组页岩储层可压性评价[J].现代地质,2021,35(4):1024-1032.  
JIANG Shengling, ZHOU Qinghua, JIANG Lihong, et al. Fracability Evaluation of Shale Reservoir in the Lower Cambrian Niutitang Formation of Well HY1, Northwestern Hunan[J]. *Geoscience*, 2021, 35(4): 1024-1032.
- [42] 荆铁亚,杨光,林拓,等.中国中上元古界页岩气地质特征及有利区预测[J].特种油气藏,2015,22(6):5-9.  
JING Tiewa, YANG Guang, LIN Tuo, et al. Geological characteristics and Prospective Zone Prediction of Meso-Epioproterozoic shale gas in China[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 5-9.
- [43] 谢婷,李琦,王向华,等.牛蹄塘与陡山沱组页岩孔隙发育差异性主控因素分析——以鄂西某井为例[J].科学技术与工程,2020,20(32):13148-13157.  
XIE Ting, LI Qi, WANG Xianghua, et al. Pore development differences and controlling factors of Niutitang and Doushantuo Formations shale: Taking a well in Western Hubei as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(32): 13148-13157.
- [44] 朱光有,赵坤,李婷婷,等.中国华南陡山沱组烃源岩的形成机制与分布预测[J].地质学报,2021,95(8):2553-2574.  
ZHU Guangyou, ZHAO Kun, LI Tingting, et al. Formation mechanism and distribution prediction of source rocks in the Ediacaran Doushantuo Formation, South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(8): 2553-2574.