

文章编号: 1001-1986(2014)02-0023-05

国外典型煤层气盆地可采资源量计算

李 勇¹, 汤达祯¹, 许 浩¹, 王 勃², 张 彪³

(1. 煤层气国家工程中心煤储层实验室, 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007; 3. 中煤地质工程总公司, 北京 100073)

摘要: 随着国内煤层气勘探开发技术的逐渐成熟, 国内油气公司开始着眼海外煤层气资源勘探开发。但由于国外煤层气盆地资料匮乏, 有效评价其可采资源量是一个难题。选取国外几个典型煤层气盆地, 将地质类比法引入煤层气可采资源量估算中。结合煤层气富集成藏的基本要素, 依据煤层气盆地实际资料, 优选了影响煤层气可采性的 10 个地质参数作为刻度区和预测区的相似系数, 二态定性量化不同地质参数。以等温吸附法确定刻度区的采收率, 结合实际采收率经验, 采用蒙特卡洛组合抽样估算了可采系数的变化范围。通过对北美、俄乌哈和澳大利亚 3 个地区 10 个煤层气盆地的可采资源量计算和对比, 发现澳大利亚的鲍恩盆地煤层气可采系数大, 可采资源量丰富, 具备良好的勘探开发潜力。该方法可为国外其他煤层气盆地的可采资源量计算提供借鉴。

关键词: 煤层气; 可采资源量; 地质类比法; 等温吸附; 蒙特卡洛法

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.02.005

Calculation of abroad coalbed methane recoverable resources

LI Yong¹, TANG Dazhen¹, XU Hao¹, WANG Bo², ZHANG Biao³

(1. Coal Reservoir Laboratory of National CBM Engineering Center, School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang Branch, Langfang 065007, China; 3. China Coal Geology Engineering Corporation, Beijing 100073, China)

Abstract: In order to improve the precision in coalbed methane (CBM) exploration, geological analogy has been employed to evaluate CBM recoverable resources. Combining the basic parameters concerning CBM accumulation and reservoir formation and the relative statistics of CBM basins that could be acquired, the paper chooses 10 geological parameters controlling CBM recoverability as index of similarity in index block and forecast blocks, further, these geological parameters were quantified through the quantitative binary status approach. The recoverable coefficient in index block was calculated by adsorption isothermal curves, in view of practical situation of CBM development, the variation range of the CBM recoverable coefficients in forecast blocks was calculated by method of Monte-carlo. The results of the recoverable resources calculation in 10 CBM basins in North America, Russia-Ukraine-Kazakhstan and Australia, as the result of an evaluation from recoverable coefficient and geological reserves, indicated that Bowen Basin in Australia is higher in recoverable coefficient and larger in recoverable resources, showing good conditions for exploration and development.

Key words: coalbed methane; recoverable resources; geological analogy; adsorption isothermal; Monte-carlo methods

全球煤层气分布广泛, 储量巨大, 已有 70 多个国家探明赋存有煤层气资源, 据国际能源机构 (IEA) 估计, 全球煤层气资源总量可达 $260 \times 10^{12} \text{m}^3$, 其中 90% 分布在 12 个主要产煤国 (表 1)^[1-2]。随着国内煤层气勘探开发的逐渐成熟, 国内油气公司开始着眼海外。近年来, 中石油一直筹备进军澳大利亚煤层气勘探开发。

煤层气可采资源量是地质储量的可采部分, 是

在现行法规政策和市场条件下, 采用现有的技术, 通过理论估算或类比的方法算得, 从已知煤层中可采出的煤层气总量, 是确定煤层气田是否具有经济价值的重要物质基础, 也是进一步确定投资规模和开发方案的重要依据^[3-6]。但由于国外煤层气盆地资料匮乏, 有效评价其可采资源量一直是一个难题。本文以国外典型煤层气盆地为例进行研究, 提出了具有可操作性的煤层气可采资源量的计算方法。

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2011ZX05062-01; 2011ZX05028-02); 国家自然科学基金项目 (41272175)

作者简介: 李 勇 (1988—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 从事煤层气开发地质研究。

表 1 世界各国煤炭及煤层气资源量
Table 1 Coal and coalbed methane resources
in different countries

国家	煤炭资源量/ 10^9t	煤层气资源量/ 10^{12}m^3
俄罗斯	6 500	17.0~113
加拿大	7 000	5.6~76.5
中国	4 000	36.81
美国	3 970	11.3
澳大利亚	1 700	8.50~14.2
德国	320	2.8
波兰	160	2.8
英国	190	1.7
乌克兰	140	1.7
哈萨克斯坦	170	1.1
印度	160	0.8
南非	150	1.7
总计	24 460	92~265

1 煤层气可采资源量计算

1.1 煤层气盆地选取

从煤层气勘探开发相对成熟、正在实施、尚未实施三级层次上选取了国外 10 个煤层气盆地进行类比分析。北美地区的煤层气勘探开发已相对成熟，对煤层气的选区勘探具有很强的指示意义，因此在一级层次上，选取了美国典型的中煤阶盆地——圣胡安盆地和低煤阶粉河盆地，以及煤层气、页岩气均已实施开发且技术相对成熟的阿巴拉契亚盆地和加拿大的阿尔伯达盆地。二级层次上选取了澳大利亚鲍恩和苏拉特盆地，这两个盆地均已进行了一定程度的煤层气工作，是当前勘探的热点地区。三级层次上选取了尚未进行大规模煤层气资源评价，但煤炭资源丰富、煤层气开发潜力可观的俄罗斯、乌克兰和哈萨克斯坦地区的库兹涅茨克、顿涅茨克、卡拉干达和埃基巴斯图兹盆地，它们是未来重要的煤层气勘探开发重点选区盆地。

1.2 可采资源量计算方法

煤层气资源量计算的主要方法有体积法、类比法、数值模拟法和产量递减法。由于后两种方法需要一定的排采数据，因此不常用；前两种方法简单、数据容易获取，是普遍采用的方法^[3, 5]。可采资源量计算步骤一般包括：a. 体积法计算煤层气资源量；b. 解吸系数法校正计算所得的煤层气资源量；c. 利用等温吸附曲线与煤层气临界解吸压力的关系，估算煤层气临界解吸压力，结合煤层气井的枯竭压力，估算出煤层气采收率，进而获得可采资源量^[7]。可见在已知资源量的情况下，可采系数的计算最为关键。本文结合地质类比的原理、计算步骤以及在实际应用中的可行性分析，

给出了煤层气可采资源量的具体计算方法流程。

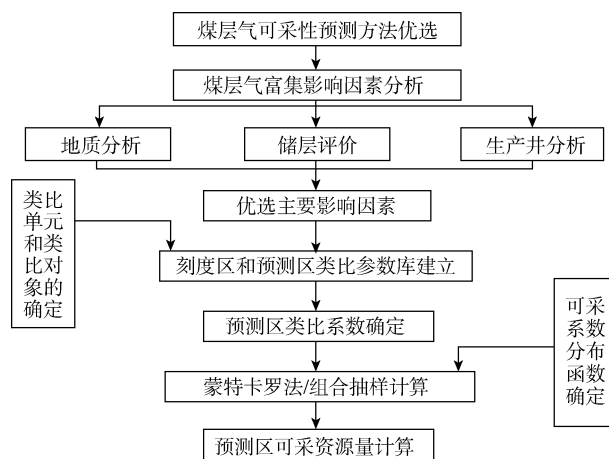


图 1 煤层气可采资源量估算流程

Fig.1 Flowchart of coalbed methane recoverable resources estimation

1.3 地质类比参数的确定

本次研究以国外典型煤层气盆地为评价单元，这些评价单元是煤层气富集单元序列中的二级单元，是控制煤层气形成的物质基础。盆地类型、盆地结构、盆地构造形态等控制了成煤物质的性质和量的大小、煤层的发育和分布；盆地后期的沉积、构造演化变迁历程控制了成煤作用和煤层气的生成过程，也控制着现今煤层气赋存的地质条件^[8-11]。盆地规模的煤层气评价是决定国外煤层气投资勘探的首要条件，由于资料的局限性，此次研究中并没有考虑盆地区块的分割，在综合考虑煤层气赋存条件的基本要素基础上，选择盆地类型、盆地构造、煤级、埋深、顶底板岩性、累积煤厚、煤层数、含气量、煤质、煤体结构共 10 个参数作为地质类比参数。

1.4 煤层气参数库的建立

研究选取美国圣胡安盆地为刻度区，评价北美的粉河、阿巴拉契亚、阿尔伯达盆地，俄乌哈地区的库兹涅茨克、卡拉干达、埃基巴斯图兹、顿涅茨克盆地和澳大利亚的鲍恩、苏拉特盆地共 9 个盆地。根据已有的地质及地球化学等资料，以刻度区和预测区的各个盆地为类比单元，分别给出各类比单元的地质参数(表 2)。这些参数都是在各个类比单元中集中优势的体现，是对研究区综合分析的结果。

刻度区和预测区类比参数是在系统收集资料的基础上定性或定量的结果，定性参数没有量化，定量参数之间数值差别大，标准不统一，无法直接计算。因此，要对原始类比参数做二态定性变换。二态定性变换要根据研究区勘探结果及经验，研究每项地质变量的门槛值是否有利于煤层气的生成与富集。各项类比参数与其对应地质变量的门槛值比较，当参数值大于门槛值时，给参数赋值为 1；当参数

值小于门槛值时, 给参数赋值为 0。表 3 为地质类
比参数二态定性处理的结果, 而低勘探程度预测区
常会出现参数不足, 此时缺项参数可由经验综合分
析判断后给定 0 或 1^[12]。

表 2 煤层气盆地地质类比参数
Table 2 Parameters of geological analogy in coalbed methane basins

地质类比参数	煤层气盆地									
	圣胡安	粉河	阿巴拉契亚	阿尔伯达	埃基巴斯图兹	卡拉干达	库兹涅茨克	顿涅茨克	鲍恩	苏拉特
盆地类型	前陆	前陆	前陆	前陆	裂谷	裂谷	克拉通	前陆	前陆	前陆
构造条件	简单	较简单	较简单	较复杂	复杂	复杂	简单	较复杂	复杂	简单
成煤环境	泻湖相	河流三角洲	三角洲	沼泽相	泥炭沼泽	泥炭沼泽	泥炭沼泽	泥炭沼泽	泥炭沼泽	泥炭沼泽
煤层埋深/m	122~1 280	45~555	457~562	800~2 800	0~600	600~900	300~1 800	300~900	300~1 200	100~400
顶/底板岩性	泥岩/砂岩	砂泥岩/ 板砂岩	砂岩/ 凝灰岩	泥岩/砂岩	砂岩/凝灰岩	砂岩/泥岩/ 泥岩	砂岩/砂岩	泥岩/砂岩	砂岩/砂岩	砂岩/砂岩
煤级/%	> 0.78	0.4	0.8~1.4	0.7~2	1.7~2.2	0.4~1.5	0.98	3.6~4.2	1.1~1.9	0.35~0.65
煤层厚度/m	21	30	13.7	20	25	45	16	21	15~30	20~30
含气量/(g·cm ⁻³)	15.6	0.7~2.3	10	12	11	13~27	20	14.7	8.5	5.33
资源丰度 /(10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	1.64	1.1			22	2.75	7.16	1.73	1.3	2.9
煤体结构	原生结构 为主	原生结构 为主	碎裂煤 为主	碎裂煤 为主	碎裂煤为主	碎裂煤 为主	原生结构 为主	原生-碎裂	碎裂-碎粒	原生结构 为主
	刻度区				预测区					

表 3 地质类比参数二态定性处理
Table 3 Processing parameters of geological analogy by qualitative binary state

地质类比参数	煤层气盆地									
	圣胡安	粉河	阿巴拉契亚	阿尔伯达	埃基巴斯图兹	卡拉干达	库兹涅茨克	顿涅茨克	鲍恩	苏拉特
盆地类型	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
构造条件	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
成煤环境	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
煤层埋深/m	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
顶/底板岩性	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
煤级/%	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
煤层厚度/m	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
含气量/(g·cm ⁻³)	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
资源丰度/(10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
煤体结构	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

1.5 各分区类比系数的确定

刻度区和预测区的类比参数二态定性处理结果
可组成 10×10 的矩阵 A , 转置矩阵 A^T 左乘矩阵 A ,
得到 10 阶对称乘积矩阵 R , 即:

$$R = A^T A = \begin{bmatrix} 8 & 5 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5 & 6 & 6 & 4 \\ 5 & 6 & 4 & 5 & 4 & 4 & 3 & 4 & 4 & 5 \\ 6 & 4 & 7 & 5 & 6 & 5 & 6 & 6 & 6 & 4 \\ 6 & 5 & 5 & 7 & 6 & 6 & 4 & 6 & 6 & 4 \\ 6 & 4 & 6 & 6 & 7 & 6 & 5 & 7 & 7 & 4 \\ 6 & 4 & 5 & 6 & 6 & 7 & 5 & 6 & 6 & 3 \\ 5 & 3 & 6 & 4 & 5 & 5 & 6 & 5 & 5 & 3 \\ 6 & 4 & 6 & 6 & 7 & 6 & 5 & 7 & 7 & 4 \\ 6 & 4 & 6 & 6 & 7 & 6 & 5 & 7 & 7 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 4 & 4 & 3 & 3 & 4 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

求出方阵 R 的特征值及其对应的特征向量, 最
大特征值为 53.503 1, 对应的特征向量为(0.346 0,
0.255 8, 0.327 5, 0.327 8, 0.347 8, 0.323 9, 0.2801,
0.350 1, 0.347 8, 0.223 23)^T, 10 个特征值的总和为
67.000 1, 最大特征值占特征值总和的 79.86%, 所
占的比重很大, 其对应的最大特征向量可以代表刻
度区每个盆地对应的权重类比系数。

1.6 可采资源分布函数和资源量计算

1.6.1 等温吸附法求圣胡安地区煤层气可采系数

鉴于评价的煤层气盆地资料的局限性, 尤其是
煤层气排采数据的缺少, 无法进行相应的储层数值
模拟, 得出定量化程度高、非常可靠煤层气可采系
数。本研究结合实际情况, 采取等温吸附曲线法确
定煤层气可采系数^[13-14]。

等温吸附曲线法主要是通过等温吸附数据计算出兰氏体积和兰氏压力、煤层气的临界解吸压力、理论最大采收率以及煤层气的可采资源量,圣胡安盆地的计算结果如图 2 所示。进而可知圣胡安盆地的煤层气可采系数为 78%^[15]。

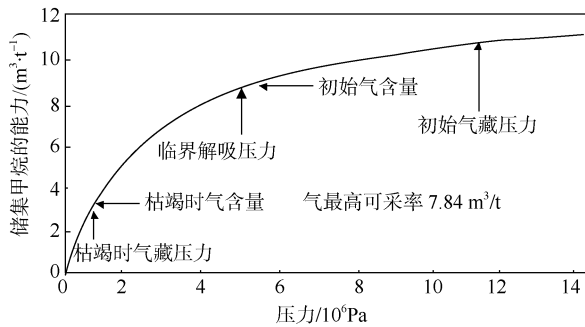


图 2 圣胡安盆地煤样等温吸附曲线

Fig.2 Adsorption isothermal curve of coal from San Juan Basin

1.6.2 蒙特卡洛法计算煤层气可采系数

以圣胡安盆地的可采系数为刻度,将各个盆地求得的类比系数归一化处理,可得各个盆地对应的可采系数(表 4)。考虑到盆地级别上各地质参数的变化和不确定性,采用蒙特卡洛随机抽样获取可采系数的取值范围。一般默认可采系数的变化符合高斯分布,主要考虑如下 4 个方面:可采系数最有可能落在平均值处(即类比所得的可采系数);接近平均值的发生概率较高;可采系数的变化呈高低对称;极值可能发生,但却非常罕见。例如粉河盆地,进行了 300 001 次抽样,可得其置信区间在 80% 以上的可采系数变化范围为 67.69%~80.09%,因此可求得其可采资源量的变化范围(图 3、表 4)。针对部分盆地计算出来的可采系数比较大,如鲍恩、顿涅茨克和埃基巴斯图兹盆地高达 78.41%,而苏拉特盆地仅为 52.37%,为拟合更好的可采系数,选用贡布尔分布,

分别选择 I 型最小极值分布和 I 型最大极值分布,考虑小于平均值或大于平均值发生的概率较高。结果表明,鲍恩、顿涅茨克和埃基巴斯图兹盆地的煤层气资源可采系数均值为 73.88%,一般大于 66.65%(图 4),苏拉特盆地的可采系数发生在 49.89%~60.23%的概率较高(图 5)。

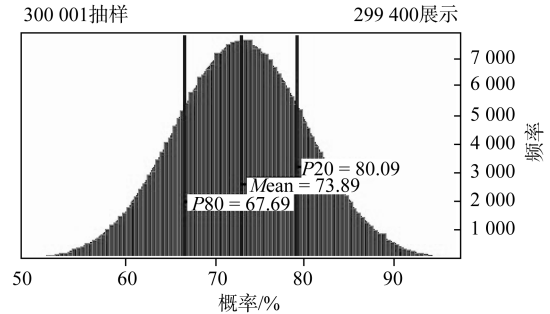


图 3 粉河盆地高斯抽样结果

Fig.3 Gauss distribution sampling results of Powder River Basin

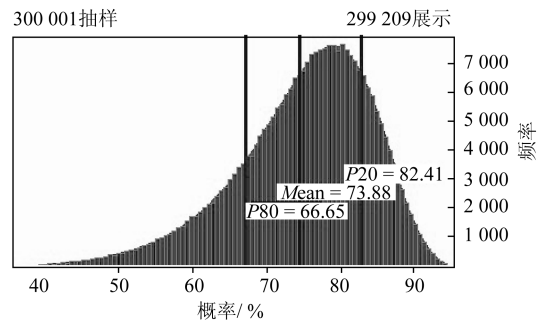


图 4 鲍恩盆地煤层气可采系数贡布尔分布抽样结果

Fig.4 Gumbel distribution sampling results of Bowen Basin

2 结 论

以地质类比法为基础,结合蒙特卡洛抽样的煤层气盆地可采资源量计算方法,可以解决煤层气资源评价中因参数不足而不能有效预测的问题,评价结果与前人的认识具有较好的对应性,可以提高煤

表 4 煤层气可采系数计算结果

Table 4 Result of coalbed methane recoverable coefficient

盆地	原始类比系数	归一化类比系数	类比的可采系数/%	资源量/ 10^{12}m^3	可采资源量/ 10^{12}m^3	最小可采系数/%	最大可采系数/%
圣胡安	0.346 0	0.110 1	78.00	1.39	1.084 2		
粉河	0.255 8	0.081 4	57.67	0.7	0.403 7	67.69	80.09
阿巴拉契亚	0.327 5	0.104 2	73.83	1.87	1.380 6	67.61	80.06
阿尔伯达	0.327 8	0.104 3	73.90	14.3	10.567 3	67.71	80.13
埃基巴斯图兹	0.347 8	0.110 6	78.41	0.075	0.058 8	66.65	82.41
卡拉干达	0.323 9	0.103 0	73.02	0.55	0.401 6	66.86	79.12
库兹涅茨克	0.280 1	0.089 1	63.14	9.8	6.188 1	57.89	68.46
顿涅茨克	0.347 8	0.110 6	78.41	2	1.568 1	66.65	82.41
鲍恩	0.347 8	0.110 6	78.41	4	3.136 2	66.65	82.41
苏拉特	0.232 3	0.073 9	52.37	0.6	0.314 2	49.89	60.23

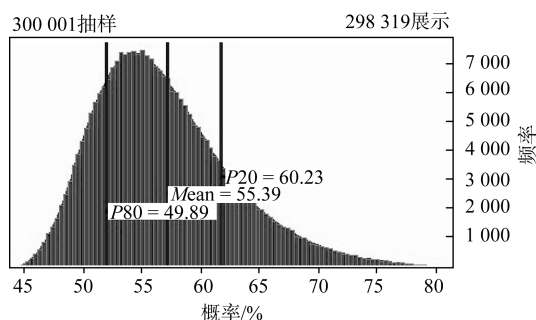


图5 埃基巴斯图兹盆地煤层气可采系数贡布尔分布抽样结果

Fig.5 Gumbel distribution sampling results of Ekibastuz Basin

层气勘探选区的方向性。

通过北美、俄乌哈、澳大利亚3个大区10个盆地的煤层气可采资源评价,认为构造条件、煤层厚度、含气量等参数是影响盆地规模评价单元的主控因素。综合评价指标,量化了刻度区和预测区的类比参数,并从地质成因角度定量解释了各盆地的相似程度。

以等温吸附曲线法获取刻度区的煤层气可采系数,类比取得预测区的可采系数后,针对不同大小的可采系数,分别以高斯分布和贡布尔分布抽样30万次,获取置信区间80%以上的可采系数的取值范围,结果简洁合理。

鲍恩、顿涅茨克和埃基巴斯图兹3个盆地的富集成藏配置条件好,煤层气资源可采系数高;结合煤层气资源量数据,以阿尔伯达、阿巴拉契亚和鲍恩3个盆地可采资源量为最高。综合对比认为,鲍恩盆地具较好的煤层气勘探开发潜力。

参考文献

- [1] 孙茂远, 刘贻军. 中国煤层气产业新进展[J]. 天然气工业,

2008, 28(3): 5-9.

- [2] 刘超. 俄乌哈三国煤层气资源评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [3] 仲伟志, 张延庆, 钱大都, 等. DZ/T 0216—2010 煤层气资源/储量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [4] 拜文华, 赵庆波, 刘锐娥. 山西沁水煤层气田采收率预测[J]. 现代地质, 2001, 15(4): 438-444.
- [5] 张新民, 韩宝山, 李建武, 等. 煤层气技术可采资源量预测方法[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 8-13.
- [6] 林大扬, 陈春琳. 煤层气可采资源量计算有关问题的探讨[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(3): 15-17.
- [7] 张文忠, 许浩, 傅小康, 等. 利用等温吸附曲线估算柳林区块煤层气可采资源量[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(1): 29-33.
- [8] 赵靖舟, 时保宏. 中国煤层气富集单元序列划分初探[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 1-4.
- [9] 姚纪明, 与并送, 车长波, 等. 中国煤层气有利区带综合评价[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 353-358.
- [10] 王琳琳, 姜波, 屈争辉. 鄂尔多斯盆地东缘煤层含气量的构造控制作用[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 14-19.
- [11] 张炬, 卢双舫, 薛海涛, 等. 鹤岗盆地煤层气成藏条件类比分析及潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 30-34.
- [12] 贾建亮, 刘招君, 郭巍, 等. 地质类比法在坳陷盆地油页岩资源评价中的应用——以松辽盆地上白垩统为例[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1474-1480.
- [13] 李忠城, 唐书恒, 吴敏杰, 等. 煤层气损失气量计算的全脱析法[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 20-24.
- [14] 李相臣, 康毅力, 尹中山, 等. 川南煤层甲烷解吸动力学影响因素实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 31-34.
- [15] AYERS W B. Coalbed gas systems, resources, and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Powder River Basins[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 1853-1890.

(上接第22页)

参考文献

- [1] 亓宏兵, 孔凡杜, 王显民, 等. 山东省滕县煤田(北部)武所屯生建煤矿 16、17 煤层水文地质补充勘探报告[R]. 滕州: 山东省煤田地质局第一勘探队, 2007.
- [2] 韩希伟, 王士路, 王显民, 等. 山东省武所屯生建煤矿井下探放水工程总结报告[R]. 滕州: 山东省煤田地质局第一勘探队, 2012.
- [3] 李成国, 荣丹文. 山东滕县煤田(北部)侏罗系地层时代划分[J]. 中国煤田地质, 1999, 11(2): 4-7.
- [4] 王思恩. 中国的侏罗系(中国地层)[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [5] 魏恒飞, 陈践发, 王冠男, 等. 含煤岩系层序地层学研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 1-7.
- [6] 李增学, 李守春, 魏久传. 事件性海侵与煤聚集规律——鲁西晚石炭世富煤单元的形成[J]. 岩相古地理, 1995, 15(1): 1-9.
- [7] 朱玉英. 山东滕县煤田晚古生代生物群及地层划分——兼论石炭—二叠系界线[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.

- [8] 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 等. 燕山—太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 593-617.
- [9] 黄汲清. 中国地质构造基本特征的初步总结[J]. 地质学报, 1960, 40(1): 35-40.
- [10] 李廷栋. 中国构造运动期序和构造发展阶段[M]. 北京: 中国地质科学院, 1985: 13-14.
- [11] 苏维, 王明镇. 山东滕县煤田石炭—二叠纪孢粉组合[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(4): 399-418.
- [12] 徐学锋. 逆断层区构造煤形成机制及分布规律的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(2): 6-8.
- [13] 李萍. 煤矿井下综合物探超前探测技术与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 75-78.
- [14] 张雁, 刘英锋, 吕明达. 煤矿突水监测预警系统中的关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 60-62.
- [15] 刘腾飞. 煤矿开采导水裂缝发育高度及影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 34-37.