俄乌哈三大煤盆地煤层气地质及开发潜力对比研究

吕玉民[1,2]，汤达祯[1,2]，许　浩[1,2]，陶　树[1,2]，张　彪[1,2]，陈贞龙[1,2]

（1. 中国地质大学 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室，北京　100083；
2. 中国地质大学 能源学院，北京　100083）

摘　要：俄罗斯、乌克兰和哈萨克斯坦（俄乌哈）三国拥有丰富的煤炭资源和煤层气资源。在美国实现煤层气商业化开发的引导下，这三大独联体国家也逐渐开展本国的煤层气勘探开发。本文在分析俄乌哈三大煤盆地（库兹涅茨克、顿涅茨和卡拉干达）构造、地层及煤层气地质特征的基础上，详细地分析这三大煤盆地煤层气开发潜力，并对其开发潜力进行仔细地对比研究。研究表明：库兹涅茨克煤盆地煤层气发育具有“巨大且巨富”的特征，非常适合煤层气规模化开发；卡拉干达煤盆地煤层气发育具有“小而肥”的特征，同样适合煤层气开发；而顿涅茨煤盆地煤层气发育具有“大而贫”的特征，与前两者比，其煤层气开发潜力明显较差。

关键词：煤层气地质；开发潜力；库兹涅茨克；顿涅茨；卡拉干达

中图分类号：F407.21　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1673－2464（2011）01－0099－09

COMPARISON OF GEOLOGY AND CBM DEVELOPMENT POTENTIAL OF THREE COAL BASINS IN RUSSIA, UKRAINE AND KAZAKHSTAN

LÜ Yu-min[1,2], TANG Da-zhen[1,2], XU Hao[1,2], TAO Shu[1,2], ZHANG Biao[1,2], CHEN Zhen-long[1,2]

(1. *Key Laboratory of Marine Reservoir Evolvement and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Russia, Ukraine and Kazakhstan are rich in coal and coalbed methane (CBM) resources. Under the direction of the success in commercially developing CBM in America, those three countries are gradually conducting exploration and development of CBM in their own counties. Based on the structure, stratigraphy and CBM geology of three coal basins (Kuznetsk Coal Basin, Donets Coal Basin and Karaganda Coal Basin) in those countries, this paper analyzes and compares in detail the development potentials of the three coal basins, and the results show that the CBM resources in Kuznetsk Coal Basin is characterized by very tremendous resources and very high density, which is favorable for large-scale CBM development; the CBM resources in Karaganda Coal Basin is characterized by small resources but high density, which is also suitable for CBM development; but the CBM resources in Donets Coal Basin is characterized by great resources but low density, which is obviously less favorable for CBM development.

Key words: coalbed methane; development potential; Kuznetsk; Donets; Karaganda

收稿日期：2010－05－15；**修订日期**：2010－11－05；**责任编辑**：刘英姿。

基金项目：国家科技重大专项（2008ZX05034－001）；国家自然科学基金重点项目（40730422）。

第一作者简介：吕玉民（1985—　），男，博士生，主要从事煤层气地质与开发研究。E-mail：yale1210@163.com

独联体国家，特别是俄罗斯、乌克兰和哈萨克斯坦，不仅有丰富的煤炭资源及常规油气资源，而且还拥有巨大的煤层气资源。据国际能源机构（IEA）的统计估算[1]，俄罗斯煤炭资源量为 6 500 $\times 10^9$ t，其煤层气资源量位居世界第一，达到 17 $\times 10^{12}$ ~ 113 $\times 10^{12}$ m^3；乌克兰煤炭资源量为 140 $\times 10^9$ t，其煤层气资源量位居世界第九，达到 2 $\times 10^{12}$ m^3；哈萨克斯坦煤炭资源量为 170 $\times 10^9$ t，其煤层气资源量位居世界第十，达到 1 $\times 10^{12}$ m^3。目前，仅有少数学者[1-7]在分析俄乌哈国家煤层气开发现状时简单地论述过三大煤盆地（库兹涅茨克、顿涅茨和卡拉干达）的煤层气地质或开发利用情况，但对这三大煤盆地的构造、地层和煤层气地质特征未进行详细阐述分析。本文在调研的基础上，详细论述这三大煤盆地的构造、地层和煤层气地质特征，进而对比分析其煤层气开发潜力。

1 库兹涅茨克盆地

库兹涅茨克盆地简称库兹巴斯，属于俄罗斯晚古生代和中生代含煤盆地，其硬煤探明储量和产量在俄罗斯居首位[8]。该盆地位于俄罗斯西西伯利亚的克麦罗沃洲，为一宽阔盆地，三面环山，西南面以萨莱尔岭为界，东南面邻接戈尔诺尔隆起，东北与库兹涅茨克山接壤。在北西方向，盆地过渡为西西伯利亚低地。盆地呈北西—南东向，长约 335 km，宽约 110 km，面积约为 2.6 $\times 10^4$ km^2，大致呈四边形。

1.1 构造

库兹涅茨克盆地为一构造复杂的复向斜（图 1）[8]。该盆地在北部与托木逆掩断层和萨莱尔岭接触处，巴拉洪群地层呈现狭窄、陡峭、局部倒转的线性褶皱；在东部与库兹涅茨克山和南部与戈尔诺尔山区相邻地区则为单斜产状，向盆地中央缓倾斜；在盆地边缘各种方向褶皱系的汇合处，发育有大型向斜构造；在西北部地区科利丘京群地层呈宽阔的地堑状褶皱带；在西南部地区为各个方向的短轴状褶曲，翼部平缓；塔尔巴甘群地层多呈现巨大而平缓的短轴向斜。

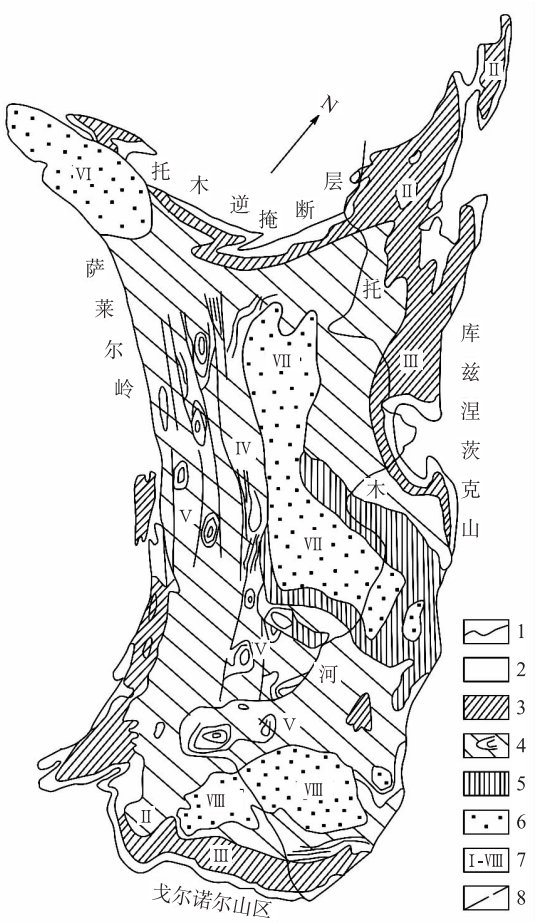

图 1 库兹涅茨克含煤盆地地质简图

1—煤盆地边界线；2—下石炭统；3—巴拉洪群；4—科利丘京群；5—下三叠统；6—塔尔巴甘群；7—主要构造带及编号（Ⅰ—线性褶皱和强烈破坏带；Ⅱ—外褶皱系共轭带，Ⅲ—单斜产状带，Ⅳ—线性延伸的地堑状褶皱带，Ⅴ—短轴褶皱带，Ⅵ~Ⅷ—中生代继承性盆地）；8—地堑状断层

注：根据文献［5］整理而来

1.2 地层

该盆地晚古生代和中生代均发育有厚层沉积岩（图 2）[9]。巴拉洪群分上巴拉洪亚群和下巴拉洪亚群，是库兹涅茨克盆地重要的晚古生代煤系地层。该群主要发育泥岩、粉砂岩。下巴拉洪亚群属于石炭系中、上统地层，该亚群发育马祖罗沃组（70 ~ 490 m）、阿雷卡耶沃组（86 ~ 660 m）。上巴拉亚群属于二叠系下统地层，该亚群发育皮罗米朱特组（90 ~ 700 m）、伊莎诺沃组（90 ~ 420 m）、克麦罗沃组（100 ~ 270 m）和乌夏茨克组（65 ~ 290 m）。

二叠系上统的科利丘京群（科利丘京阶）是库兹涅茨克盆地重要的晚古生代煤系地层。该群发育有伊林斯基亚群（下阶）和伊鲁拿科夫亚群（上阶），主要岩性为泥岩和粉砂岩。伊林斯基亚群由库兹涅茨克组、卡赞科沃－马尔基诺组（240～1400 m）和乌斯卡特组（200～450 m）组成。伊鲁拿科夫亚群由列宁斯克组（380～720 m）、格拉莫捷伊诺组（320～630 m）和泰卢甘组（680～900 m）组成。在该两亚群中仅库兹涅茨克组地层不发育煤层。

<table>
<tr><th>系</th><th>统</th><th colspan="2">阶</th><th>组</th></tr>
<tr><td>侏罗系</td><td></td><td colspan="2">塔尔巴甘阶</td><td></td></tr>
<tr><td>三叠系</td><td>下统</td><td colspan="2">马利采夫阶(无煤)</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">二叠系</td><td rowspan="2">上统</td><td rowspan="2">科利丘京阶</td><td>上阶</td><td>泰卢甘组
格拉莫捷伊诺组
列宁斯克组</td></tr>
<tr><td>下阶</td><td>乌斯卡特组
卡先赞科沃-马尔基诺组(无煤)
库兹涅茨克组(无煤)</td></tr>
<tr><td>下统</td><td colspan="2">上巴拉洪阶</td><td>乌夏茨克组
克麦罗沃组
伊莎诺沃组
皮罗米朱特组</td></tr>
<tr><td rowspan="3">石炭系</td><td>上统</td><td rowspan="2" colspan="2">下巴拉洪阶</td><td>阿雷卡耶沃组</td></tr>
<tr><td>中统</td><td>马祖罗沃组</td></tr>
<tr><td>下统</td><td colspan="2"></td><td>奥斯特洛格组(无煤)</td></tr>
</table>

图 2　库兹涅茨克盆地地层柱状图

三叠系下统马利采夫群（马利采夫阶）主要岩性由砂岩和粉砂岩组成，同时有侵入岩发育，地层厚度为 360～1 640 m。该地层不含煤。

侏罗系的塔尔巴甘群（塔尔巴甘阶）是该盆地重要的中生代煤系地层，盆内地层厚度 800～1 800 m。主要岩性由泥岩、粘土岩夹粉砂岩组成，底部发育砂岩并夹有砾岩。

1.3　煤层气地质特征

1.3.1　煤层发育特征

该盆地在早石炭世海相沉积之上，发育有厚达 9 km 的晚古生代（晚石炭世—晚二叠纪）和中生代（三叠纪—侏罗纪）含煤岩系。晚古生代含煤岩系包括石炭纪—早二叠世巴拉洪群和晚二叠世科利丘京群。巴拉洪群发育在复向斜边缘部分，呈狭窄条带，长约 15～25 km。它在复向斜中央被较年轻的地层覆盖，仅在局部隆起区出露地表。科利丘京群在复向斜中央普遍发育。在晚古生代地层的冲刷面上，发育有晚三叠世—侏罗纪塔尔巴甘群含煤岩系。

库兹涅茨克盆地巴拉洪群下亚群含煤性差且不稳定。在盆地的北部和南部，含有厚达数米有工业性开采意义的不稳定煤层。其上亚群的含煤性沿剖面往上增大，在一些岩组中含有 20 层厚 2.5～10 m（个别为 25～32 m）的煤层。科利丘京群下亚群含有许多煤层，但主要是薄的煤层，盆地南部含煤系数最大，可采煤层的厚度一般为 1.5～2.5 m（个别为 8～10 m）；其上亚群中部层位含煤系数高而稳定，在盆地中部含有多达 40 层厚 1～3 m（个别为 10～25 m）的可采煤层。在塔尔巴甘群中发现有 11～56 层煤层，其中 5～14 层达到可采厚度（0.8～9.4 m），以中央盆地及其以南的向斜的西部边缘含煤系数最大。巴拉洪群煤层主要呈简单结构（占 37%）和中等复杂结构，煤岩成分复杂，以暗煤为主。科利丘京群煤层主要呈中等复杂结构（60%～70%）和复杂结构（26%～30%），以亮煤为主，多半为光亮型煤和半亮型煤。塔尔巴甘群煤层结构复杂而不稳定，厚度易变。

1.3.2　煤岩煤质特征

该盆地蕴藏有各种变质程度的煤，煤质优良，炼焦煤品种齐全，焦煤、肥煤、气煤和瘦煤的储量都很丰富，而且易于洗选，结焦性好，硫含量低（0.3%～1.0%），磷含量也低（0.002%～0.07%）。巴拉洪群的煤的灰分为 9.5%～20.5%，平均为 14%。

盆地内硬煤平均水分含量是10%、灰分产率是19%、含硫量<0.5%、热值23.2 MJ/kg[10]。越接近地面，煤层含硫量越低，但水分含量越高。开采的煤炭主要属于高挥发分烟煤B，部分属于高挥发分烟煤A和中挥发分烟煤。

1.3.3 含气性及煤层气资源

盆内所有矿井都是在有瓦斯的条件下进行开采，瓦斯含量6~40 m^3/t。煤层含气量最高达到25~30 m^3/t。

库兹涅茨克盆地煤层气资源潜力巨大，具有良好的开发潜力。根据全俄天然气和天然气技术科学研究院估算[2]，库兹涅茨克盆地1 800 m埋深以浅的煤层气资源量为13.1×10^{12} m^3。Marshall(1996)[10]等人仅基于煤矿煤炭平衡储量，估算库兹涅茨克煤盆地的甲烷资源量达到$194\times10^9\sim342\times10^9$ m^3。其中，已开采的矿区甲烷量估计为$119\times10^9\sim204\times10^9$ m^3；盆地煤炭工业储量（即计划开采煤炭储量）中的甲烷量估计为$69\times10^9\sim120\times10^9$ m^3。根据东方煤矿安全研究院提供的数据[10]，库兹涅茨克盆地煤层中的甲烷资源总量估计达6.6×10^{12} m^3，盆地内（包括煤层、夹矸和围岩地层）甲烷资源总量达到26.7×10^{12} m^3。由于各个机构或学者对库兹涅茨克盆地的煤层气资源量估算方法不同，其所得到的煤层气资源量也存在较大差异，但仍可看出该盆地巨大的煤层气资源潜力。这也正是俄罗斯政府在库兹涅茨克煤盆地开展煤层气先导性工程的原因。

2 顿涅茨盆地

2.1 构造

顿涅茨盆地位于第聂伯-顿涅茨盆地的东南部，处于东欧克拉通南部的晚泥盆世断裂构造带(图3)[11]。在顿涅茨和第聂伯之间存在马里乌波尔-库尔斯克区域构造线。第聂伯-顿涅茨盆地西侧是相对较浅的普里皮亚特地槽，东侧为卡尔皮斯基隆起。基底由东欧克拉通结晶岩组成，其上覆为中泥盆统—石炭系地层，呈不整合面接触，厚度超过20 km[12]。

顿巴斯褶皱带构造，即第聂伯-顿涅茨盆地反转部位，主要由WNW-ESE展布的背斜和向斜组成。霍利夫卡（主体）背斜是该区最大的褶皱，其特点为两翼基本对称且倾角陡峭（60°~80°）。该背斜两翼为南北向斜（图3）。主要的逆冲断层发育在盆地的北缘，而盆地南缘发育小型褶皱、反转断层和旋转断块[13]。

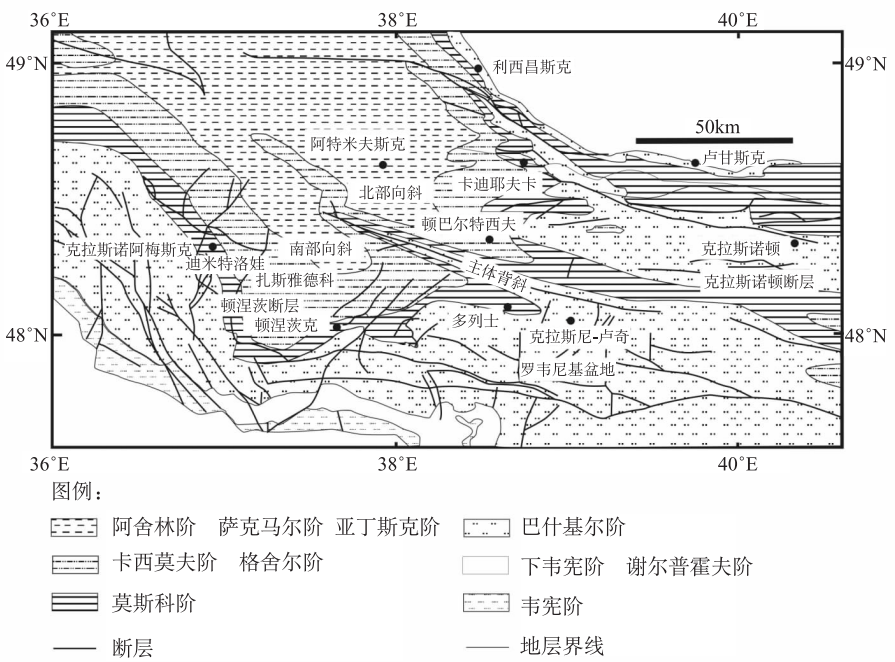

图3 顿涅茨含煤盆地地质略图

顿涅茨盆地西南部主要是克拉斯诺梅斯克单斜和卡勒米乌斯－特来特斯沉降区[14]。克拉斯诺梅斯克单斜向 NE 方向倾斜且覆盖在马里乌波尔－库尔斯克区域构造线之上。克拉斯诺梅斯克单斜东侧逐渐转变为卡勒米乌斯－特来特斯沉降区，这表明沿东南延伸的南部向斜与沿西南延伸的沃勒特切斯克向斜型构造相交。卡勒米乌斯－特来特斯沉降区东缘位于顿涅茨和马凯耶夫卡附近，由一组沿东北延伸的断层组成。

2.2　地层

该盆地的煤系地层为石炭系地层[15]，依次划分为卡西莫夫阶、莫斯科阶、巴什基尔阶、谢尔普霍夫阶和韦宪阶（图 4）。上石炭统卡西莫夫阶发育阿威罗夫斯克组地层，该地层不含煤。中石炭统分为莫斯科阶和巴什基尔阶。莫斯科阶发育埃萨耶夫斯克组、霍利夫斯克组、阿勒马兹组和卡门斯克组，是重要的含煤地层。巴什基尔阶发育巴罗卡立文斯克组、斯莫立纳瓦斯克组、莫斯皮斯克组和曼德鲁肯斯克组。下石炭统细分为谢尔普霍夫阶和韦宪阶，其中谢尔普霍夫阶是石炭系另一个重要的含煤地层（萨马勒斯克组）。韦宪阶发育帕杜阁莱诺斯组地层。

系	统	阶	组
侏罗系			
三叠系	下统		
二叠系	上统		
	下统		
石炭系	上统	卡西莫夫阶（无煤）	阿威罗夫斯克组
	中统	莫斯科阶	埃萨耶夫斯克组 霍利夫斯克组 阿勒马兹组 卡门斯克组
		巴什基尔阶	巴罗卡立文斯克组 斯莫立纳瓦斯克组 莫斯皮斯克组 曼德鲁肯斯克组
	下统	谢尔普霍夫阶	萨马勒斯克组
		韦宪阶	帕杜歌莱诺斯组

图 4　顿涅茨盆地地层柱状图

2.3　煤层气地质特征

2.3.1　煤层发育特征

顿涅茨盆地主要的煤系地层为石炭系地层，尤其是莫斯科阶和谢尔普霍夫阶地层发育大量的煤层。该盆地煤层最大的特征是煤层多但单层厚度偏小。石炭系煤系地层含有 330 多个煤层，其中煤厚小于 0.45 m 的煤层达到 200 层，仅有 130 层煤层厚度大于 0.45 m。少数煤层的最大厚度为 1.8 m（偶尔达到 2.5 m）。在厚度大于 0.45 m 的 130 层煤层中，40% ~60% 的厚度为 0.45 ~0.60 m；厚度大于 1m 的煤层数仅约占厚度大于 0.60 m 的煤层数的 20%[8]。

2.3.2　煤岩煤质特征

顿涅茨煤大部分是腐植煤，含有分散透镜状或呈腐殖－腐泥型的薄层。如上所述，顿涅茨的整个石炭系地层中均发育煤层，尤其是在谢尔普霍夫阶和莫斯科阶地层。

早谢尔普霍夫世煤层聚集在相对狭窄的海滨区，富含惰质组和壳质组[15]。低灰分，中低硫分和惰质组向上逐渐递增，表明煤沉积于高位沼泽中。

莫斯科阶煤层侧向展布广泛且总体上富含镜质组[15]。低硫分，低灰分的 k_7 煤层形成于高位沼泽相或没有碎屑充填的低位沼泽相。发育有分流河道的 l_1 和 l_3 煤层形成于低位沼泽相。这两层煤层厚度都大于 2 m。煤层 m_2 和 m_3 硫分含量高，沉积环境为受海相影响的泥炭沼泽相。与此相比，m_5^1 顶部煤层同生硫含量低，表明该煤层形成于湖相环境。下莫斯科阶 n_1 煤层，厚达 2.4 m，形成于富含苔藓植被和蕨类植被的沼泽区。n_1 煤层的特征介于谢尔

普霍夫阶煤层和其他的莫斯科阶煤层之间。

总体上看，谢尔普霍夫阶和莫斯科阶煤有很大的区别，谢尔普霍夫阶煤中的壳质组和惰质组含量高于莫斯科阶煤[15]。

2.3.3 含气性和煤层气资源

Alsaab 等人（2009）[14] 利用 Antsiferov 等人于 2004 年[16] 用解吸法测得的 100 个含气量数据绘制出的煤层现今甲烷含气量等值线图显示多列士地区甲烷含量为 0，而在顿涅茨盆地主体背斜和南北向斜以及克拉斯诺顿地区靠近断裂的甲烷含量最大，达 17 m^3/t。

根据乌克兰国内的相关估算[17]，顿涅茨盆地埋深在 500 ~ 1 800 m，煤厚在 0.3 m 以上的煤层吸附煤层气量为 $1.4 \times 10^{12} \sim 2.5 \times 10^{12}$ m^3。全俄天然气和天然气技术科学研究院 1998 年[1] 与俄罗斯煤层气研究中心（Uglemetan）2006 年[18] 估算顿涅茨煤盆地煤层气资源量达到 1.2×10^{12} m^3，占乌克兰煤层气资源总量的 60% 以上。

3 卡拉干达盆地

3.1 构造

该盆地构造特征以简单的斜坡褶皱或倾角为 5 ~ 20°（偶尔达到 40°）的单斜为主。从构造分析可知，盆地大部地区处于轻微挤压或伸展的地球动力学背景[19]。盆地发育 4 个主体向斜：坦特克、萨鲁班鲁尔、卡拉干达和沃勒科奈索库尔斯克。前 3 个向斜组成该盆地的煤炭工业生产区，其地下埋深 700 ~ 1 300 m 的地质情况已基本进行过详查。

3.2 地层

卡拉干达煤田的整个含煤地层可分为 5 个煤系：阿库都克斯克煤系、阿什利亚里克斯克煤系、卡拉干达煤系、阿拉巴斯克煤系和多林斯克煤系。阿什利亚里克斯克煤系、卡拉干达煤系和道宁斯克煤系为可采煤系；阿库都克斯克煤系和阿拉巴斯克煤系只含有厚度不大的煤夹层，因而没有工业价值。煤层可产总厚度 40 m，煤层平均厚度 2.5 m（个别为 7 ~ 8 m）。

3.3 煤层气地质特征

3.3.1 煤层发育特征

阿什利亚里克斯克煤系共有 26 层煤，其中有 19 层煤达到了开采厚度。这个煤系的煤均为高灰煤。

卡拉干达煤系是煤田的主要煤系。煤系的总厚度达到 900 ~ 1 100 m。组成煤系的岩层为砂岩、泥岩和烟煤煤层。卡拉干达煤系与阿什利亚里克斯克煤系的区别是：该煤系有海生动物化石群夹层，含有大量的植物化石。卡拉干达煤系有 29 层煤，其中有 13 层煤达到了开采厚度。

多林斯克煤系，即煤田的第三含煤系，共有 10 层煤，其中有 6 层煤达到了开采厚度。

3.3.2 煤岩煤质特征

卡拉干达煤盆地石炭系煤层灰分一般为 10% ~ 35% 且随地层向上有递减的趋势。煤的脆性随光亮显微组分含量的增加而增大。一般来说，镜质组含量越大，煤的硬度越小。整个卡拉干达盆地煤属于脆性煤和半脆性煤。

3.3.3 含气性及煤层气资源

卡拉干达煤盆地内甲烷带顶面深度为 60 ~ 250 m，而各矿区甲烷带顶面深度主要取决于地质构造特征。煤层甲烷含量从甲烷带顶面到 400 ~ 500 m 埋深迅速增加（从 0 到 15 ~ 20 m^3/t），但增加速度迅速下降。到 800 ~ 1 800 m 埋深时，煤层甲烷含量仅为 22 ~ 27 m^3/t。坦特克地槽含煤区多林斯克组煤层含气量随煤层埋深从 14.5 m^3/t 增加到 27 m^3/t；坦特克组煤层含气量为 12 ~ 24 m^3/t，煤层最大埋深 1 000 m。萨兰斯克煤田 700 ~ 1 300 m 埋深的煤层含气量稳定，达 22 ~ 25 m^3/t。泰勒迪库克斯基煤田埋深从 200 ~ 700 m 的煤层，甲烷含量相应地从 10 m^3/t 增加到 23 m^3/t。萨鲁班鲁林斯克煤田煤层含气量稳定：700 m 埋深煤层含气量 24 m^3/t；1 500 m 埋深煤层含气量为 27 m^3/t。

据全俄天然气和天然气技术科学研究院估算，卡拉干达煤盆地煤层气资源量为 0.5×10^{12} m^3[1]。Umarhajieva 等人 2003 年估算卡拉干达盆地煤层气资源量达 0.55×10^{12} m^3[19]。

4　三大煤盆地煤层气开发潜力对比

库兹涅茨克、顿涅茨和卡拉干达煤盆地是前苏联时期最为重要的煤炭生产基地。从上面的分析可以看出，该三大煤盆地不仅蕴藏丰富的煤炭资源，而且还拥有巨大的煤层气资源，且具有较好的煤层气开发潜力（表 1）。由表 1 可清楚地对比分析这三大煤盆地的煤层气开发潜力[20]。

4.1　构造特征

三大煤盆地的地质构造背景较为简单，明显地体现在各个盆地的构造特征上。库兹涅茨克煤盆地为一构造较复杂的复向斜；顿涅茨煤盆地主体发育为由背斜与向斜组成的褶皱带；而卡拉干达构造更为简单，以简单的斜坡褶皱或倾角不大的单斜为主。该构造背景下往往发育局部的应力集中区，如向斜等。这对煤层气富集起到积极的作用。同时，该构造背景也指示后期构造改造较弱，也有利于煤层气藏的保存。因此，这三大煤盆地为煤层气富集和保存提供了较好的构造背景。

4.2　煤岩煤质

煤岩煤质是影响煤层吸附能力的关键因素。从表 1 中可知，三大煤盆地煤岩煤质整体较好，但也存在一些特点。库兹涅茨克煤盆地平均水分含量 10%，灰分产率达到 19%，含硫量较低，小于 0.5%。该盆地煤的镜质体反射率介于 0.6% ~ 2.0%。顿涅茨煤盆地灰分产率较库兹涅茨克煤盆地略低，为 12% ~18%，但含硫量明显高于库兹涅茨克煤盆地，达 2.5% ~ 3.5%。该盆地煤的镜质体反射率分布范围极广，为 0.4% ~6.5%。卡拉干达煤盆地煤层灰分明显高于前两个盆地，达到 10% ~35%；而其镜质体反射率明显低于前两者盆地，仅为 0.8% ~1.2%。

从煤岩煤质看，库兹涅茨克煤盆地具有煤层气开发潜力，顿涅茨盆地次之，再次为卡拉干达盆地。

4.3　煤层特征

由于受沉积、构造的地质因素的影响，这三大煤盆地的煤层发育特征各不一致，且各具特点。从表 1 中的煤层层数和煤层厚度参数可以看出：库兹涅茨克煤盆地发育煤层多且煤厚大。该盆地煤层平均达 71 ~116 层，局部地区煤层数更是达到 300 多层，最大单煤层厚度可达 32 m。而顿涅茨煤盆地发育煤层多但煤厚薄。该盆地内发育的 330 多层煤层中，煤厚大于 0.45 m 的仅有 130 层。在大于 0.45 m 的煤层中，也仅有约 10% 的煤层厚度大于 1 m。与前两个煤盆地相比，卡拉干达盆地发育煤层数偏

表 1　三大煤盆地煤层气地质特征对比

煤盆地	库兹涅茨克	顿涅茨	卡拉干达
面积/ $\times 10^4$ km^2	2.6	6	0.3
构造特征	构造复杂的复向斜	由 WNW – ESE 展布的背斜和向斜组成的褶皱带	以简单的斜坡褶皱或倾角较低的单斜为主
煤岩煤质	平均水分含量 10%，灰分产率 19%，含硫量 <0.5%	灰分 12 – 18%，含硫量较高，达 2.5 – 3.5%	煤层灰分 10% ~35%
煤炭储量/ $\times 10^8$ t	6 369	1 410	413
煤级/%	0.6 ~2.0	0.4 ~6.5	0.8 ~1.2
聚煤密度 $\times 10^4$ t/km^2	2 800	214	1 200
煤层层数	71 ~116（局部 300）	330 多层	30 左右
煤层厚度/m	0.8 ~32	0.45 ~2.5（仅有 130 层）	1 ~8
含气量/m^3/t	25 ~ 30（最高）	17（最高）	12 ~27（最高）
CBM 资源量 $\times 10^{12}$ m^3	6.6 ~13.1	1.2 ~2.5	0.5 ~0.55
煤层气丰度 $\times 10^6$ m^3/km^2	500 ~3 500	80 ~107（平均）	275（平均）　400 ~700（前景区）

少，仅约 30 层，但该盆地单煤层厚度较大，最大能达到 8 m。

煤层多、煤厚大有利降低煤层气开发的钻井成本，实现煤层气大规模开发。从这点可以明显地看出，库兹涅茨克煤盆地更具有煤层气开发潜力，其次是卡拉干达盆地，再次为顿涅茨盆地。

4.4 煤层含气量

煤层含气性的高低是影响煤层中煤层气资源量的关键因素之一。从表中看出，库兹涅茨克煤盆地煤层含气量最大，达到 25 ~ 32 m^3/t；卡拉干达煤盆地煤层含气量次之，为 12 ~ 27 m^3/t；而顿涅茨煤盆地最大含气量达到 17 m^3/t。由此看出，这三大煤盆地煤层的含气量都较大，仅从煤层含气量难以对其煤层气开发潜力进行对比分析，主要原因是这些煤盆地的煤层对煤层气的最大吸附量未知，即煤层含气饱和度难以进行比较。

4.5 聚煤密度与煤层气丰度

聚煤密度在一定程度上控制着煤层气丰度。从表中这两个参数看，煤层气丰度与聚煤密度呈正比关系[20]。库兹涅茨克煤盆地聚煤密度最大（2 800 × 10^4 t/km^2），其煤层气资源丰度也是三大盆地中最高的，达 500×10^6 ~ $3\ 500 \times 10^6$ m^3/km^2。聚煤密度居于其次的是卡拉干达煤盆地，其煤层气资源丰度平均为 275×10^6 m^3/km^2，一些前景区能达到 400×10^6 ~ 700×10^6 m^3/km^2。三大煤盆地中聚煤密度最低的是顿涅茨煤盆地，其煤层气资源平均丰度仅为 80×10^6 ~ 107×10^6 m^3/km^2。

煤层气丰度越高的煤盆地，其煤层气开发潜力往往越大，也越有利于降低生产成本并适合煤层气规模化开发。从这点考虑，库兹涅茨克盆地无疑是这 3 个国家中最有利的煤层气开发潜力区，其次是卡拉干达盆地，再次为顿涅茨盆地。

4.6 煤炭储量与煤层气资源量

煤层气藏是煤层气在煤层中自生自储而形成的非常规天然气藏。煤炭资源量的大小在一定程度上决定了煤层气的资源量。从表 1 中同样可以看出这两者间的正比关系。库兹涅茨克煤盆地煤炭储量最大，为 $6\ 369 \times 10^8$ t，煤层气资源量为 6.6×10^{12} ~ 13.1×10^{12} m^3。顿涅茨煤盆地煤炭储量其次，为 $1\ 410 \times 10^8$ t，煤层气资源量为 1.2×10^{12} ~ 2.5×10^{12} m^3。卡拉干达煤盆地煤炭储量最低，仅为 413×10^8 t，煤层气资源量为 0.5×10^{12} ~ 0.55×10^{12} m^3。

考虑到盆地面积，可以明显看出这 3 个盆地煤层气资源富集特征。库兹涅茨克煤盆地面积比顿涅茨煤盆地面积小 50% 以上，但其煤炭储量却是顿涅茨煤盆地煤炭储量的 4 倍之多，而煤层气资源量更是达到顿涅茨盆地的 6 倍以上。而卡拉干达煤盆地煤炭储量和煤层气资源量最小，但其 0.3×10^4 km^2 的盆地面积上煤层气资源量达 0.5×10^{12} ~ 0.55×10^{12} m^3。由此可看出，卡拉干达煤层气发育具有明显的“小而肥”特征，顿涅茨煤盆地则具有明显的“大而贫”特征，而库兹涅茨克煤盆地具有明显的“巨大而巨富”特征。因此，库兹涅茨克煤盆地和卡拉干达煤盆地比顿涅茨煤盆地具有更好的煤层气开发潜力，开发潜力最好的为库兹涅茨克煤盆地。

5 结论与认识

通过资料调研和上述对比分析，可得出如下几点结论与认识：

1）库兹涅茨克煤盆地、顿涅茨煤盆地和卡拉干达煤盆地聚集有丰富的煤层气资源，为这些盆地进行煤层气勘探开发提供资源保障。

2）从三大煤盆地的构造特征、煤岩煤质、煤层特征、含气性、聚煤密度与煤层气丰度以及煤炭储量与煤层气资源量等方面的对比研究，表明库兹涅茨克煤盆地的煤层气开发潜力最大，其次是卡拉干达煤盆地，再次为顿涅茨煤盆地。

3）库兹涅茨克、顿涅茨和卡拉干达三大煤盆地地质特征差异明显。库兹涅茨克煤盆地煤层气发育具有“巨大且巨富”的特征，非常适合煤层气规模化开发；卡拉干达煤盆地煤层气发育具有“小而肥”的特征，同样适合煤层气开发；而顿涅茨煤盆地煤层气发育具有“大而贫”的特征，与前两者相比，其煤层气开发潜力较差。

参考文献

[1] 李鸿业. 世界主要产煤国煤层气资源开发前景[J]. 中国煤层气, 1995(2): 35-38

[2] 奥雷格·泰拉科夫, 朱超. 独联体煤层气开发利用现状[J]. 中国煤层气, 1999(2): 26-28

[3] 房照增. 独联体国家煤层气开发现状[J]. 中国煤炭, 2000, 26(4): 59-33

[4] 宫诚. 国外煤层气发展现状[J]. 中国煤炭, 2005, 31(3): 74-75

[5] 崔荣国. 国内外煤层气开发利用现状[J]. 国土资源情报, 2005(11): 22-26

[6] 李旭. 世界煤层气开发利用现状[J]. 煤炭加工与综合利用, 2006(6): 41 -45

[7] 张泓, 晋香兰, 李贵红,等. 世界主要产煤国家煤田与煤矿开发地质条件之比较[J]. 煤田地质与勘探, 2007(6): 19-30

[8] 杨锡禄, 周国铨主编. 中国煤炭工业百科全书:地质·测量卷[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995: 162-163

[9] U.S. Environmental Protection Agency(EPA). Reducing Methane Emission from Coal Mines in Russia: a Handbook for Expanding Coalbed Methane Recovery and Use in the Kuznetsk Coal Basin [EB/OL]. (2010 -03 -14)[2005 -12 -5]. http://www.epa.gov/cmop/docs/int005.pdf

[10] Marshall J S, Pilcher R C, Bibler C J. Opportunities for the development and utilization of coalbed methane in three coal basins in Russia and Ukraine[C]//Coalbed Methane and Coal Geology. London: Geological Society Special Publications, 1996: 89-101

[11] Stovba S M, Stephenson R A. The donbas foldbelt: its relationships with the uninverted donets segment of the dnieprdonets basin, Ukraine[J]. Tectonophysics, 1999, 313: 59-83

[12] Chekunov A V, Kaluzhnaya L T, Ryabchun L I. The Dnepr-Donets paleorift, Ukraine, deep structures and hydrocarbon accumulations[J]. Journal of Petroleum Geology, 1993(16): 183-196

[13] Privlov V A, Zhykalyak M V, Panova E A. Geologic controls on coalbed occurrence in the Donets Basin(Ukraine)[EB/OL](2009 -03 -15)[2010 -04 -16]. http://www.coalinfo.net.cn/coalbed/meeting/2203/papers/coal-mining/CM054.pdf

[14] Alsaab D, Elie M, Izart A, et al. Distribution of thermogenic methane in Carboniferous coal seams of the Donets Basin (Ukraine): Applications to exploitation of methane and forecast of mining hazards[J]. International Journal of Coal Geology, 2009(78): 27-37

[15] Sachsenhofer R F, Privalov V A, Zhyakalyak M V, et al. Petrography and geochemistry of Carboniferous coal seams inthe Donets Basin (Ukraine): implications for paleoecology [J]. International Journal of Coal Geology, 2003(55): 225-259

[16] Antsiferov A V, Tirkel M G, Khoklov M T, et al. Gas occurrence in the Donbas Coal Deposits[J]. NaukovaDumka, 2004, 232: 38-49

[17] T. Berman, J. Siegel. Report on Participation by Developing/Transition Countries[EB/OL]. Washinton, 2006. (2010 -3 -14)[2007 -5 -23]. http://www.methanetomarkets.org/m2m2009/documents/events_coal_20060522_beijing.pdf

[18] Tailakov O. Opportunities and barriers for CMM development: A perspective from developing countries and transition economies [EB/OL]. (2009 -05 -17)[2010 -3 -22]. http://www.methanetomarkets.org/events/2005/all/docs/tailakov.pdf

[19] Umarhajieva N S, Mustafin R K, Alekseev E G. Central Kazakhstan coal-fields potential for development of coalbed methane production projects[EB/OL]. (2009 -06 -17)[2010 -02 -11] http://www.coalinfo.net.cn/coalbed/meeting/2203/papers/coal-mining/CM025.pdf

[20] 陈毓川, 常印佛, 裴荣富, 等. 中国新生代成矿作用: 上册[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 53-56