第19卷1期
2007年2月

中国煤田地质
COAL GEOLOGY OF CHINA

Vol.19 No.1
Feb. 2007

文章编号:1004-9177(2007)01-0066-05

地面核磁共振(NMR)找水技术及其应用效果浅析

曹福祥[1,2],李凤哲[2]

(1.中国地质大学,湖北 武汉 430074;2.中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所,河北 保定 071051)

摘 要:通过鄂尔多斯盆地东部黄土覆盖区试验实例,介绍了地面核磁共振找水技术的发展现状及其基本原理、测量参数、影响因素、技术特点和应用范围,说明了该方法在探测碎屑岩类浅层风化裂隙水和构造带裂隙水中的效果。同其它物探方法相比,该方法可量化含水层深度、厚度、单位体积含水量以及平均孔隙度等水文地质参数,在地下水勘查中具有广阔的应用前景。

关键词:核磁共振;直接找水;风化裂隙水;构造带裂隙水;应用效果

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

自1946年发现物质中的核磁共振(NMR)现象以来,仅有几十年的历史,已在地学方面得到了广泛的应用。地面核磁共振找水方法的创意是在1962年提出的,1996年法国地调局(BRGM)IRIS公司研制成功地面核磁共振感应系统(NUMIS),其勘探深度小于100m。1999年NUMIS系统升级为NUMIS^{+}系统,探测深度可达150m。其后,又推出新型轻便的NUMIS^{Lite}系统,探测深度小于50m。1997年底中国地质大学(武汉)引进第一套NUMIS系统,1998—2000年中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所(方法所)与中国地质大学(武汉)合作开展了核磁共振找水方法技术研究,在河北、新疆、宁夏、陕西等地进行了一系列试验工作,取得了较好的效果。

1 核磁共振(NMR)测深方法简介

1.1 NMR测深方法的基本原理

地面核磁共振找水方法又称地面核磁共振测深。其利用不同物质原子核弛豫特性差异产生的NMR效应,观测、研究地层中水质子产生的核磁共振信号的变化规律,进而了解探测区地下水的分布情况。在能够产生NMR效应的诸多物质中,水中氢核(质子)具有核子顺磁性,其磁矩不为零,且氢核是地层中具有核子顺磁性物质丰度最高、磁旋比最大的核子。在稳定地磁场B_0的作用下,氢核象陀螺一样绕地磁场方向旋进(图1),其旋进频率(拉摩尔圆频率ω_0)与地磁场强度B_0和氢核的磁旋比γ有关:

$$\omega_0=\gamma B_0 \quad , \qquad (1)$$

由上述可知,氢核在地磁场作用下,处在一定的能级上。如果以具有拉摩尔频率的交变磁场$B_1(\omega_0)$对地下水中的质子进行激发,则使原子核能级间产生跃迁,即产生核磁共振。通过由小到大地改变激发脉冲矩q($q=I_0\cdot t_p$,式中I_0、t_p分别为激发电流脉冲的幅值和持续时间)来探测由浅到深含水层的赋存状态,实现直接寻找地下水的目的。

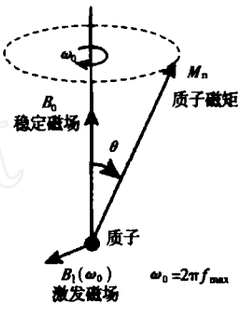


图1 质子磁矩在磁场作用下的旋进运动
Figure 1 Precession movement of proton magnetic moment under the magnetic field

在NMR测深方法中,为了获得NMR信号,通常向铺在地面上的线圈(发射/接收线圈)中供入频率为拉摩尔频率的交变电流脉冲,交变电流脉冲的包络线为矩形(图2a)。在交变电流形成的交变磁场激发下,地下水中氢核形成宏观磁矩。这一宏观磁矩在地磁场中产生旋进运动,其旋进频率为氢核所特有。在切断激发电流脉冲后,用同一线圈拾取由该激发脉冲矩激发产生的NMR信号,该信号的包络线呈指数规律衰减(图2b)。NMR信号强弱或衰减快慢直接与含水层中氢质子的数量、含水层孔隙大小有关,即NMR信号的幅值与所探测空间内自由水含量成正比,这就是地面核磁共振找水方法的依据。

1.2 NMR测深方法测量的参数

当激发脉冲终止后,接收天线观测到的NMR信号$E(t,q)$(图2b)包络线按指数规律衰减:

$$E(t,q)=E_0(q)\exp(-t/T^*_2)\sin(\omega_0+\varphi_0) \quad , \qquad (2)$$

式中:$E_0(q)$是NMR信号的初始振幅;T^*_2是NMR信号的平均衰减时间,在均匀地磁场中,$T^*_2=T_2$(横向弛豫时间);φ_0是NMR信号的初始相位。另外,

作者简介:曹福祥(1964—),男,高级工程师,一直从事水文物探工作。现为中国地质大学(北京)博士生。

收稿日期:2006-04-16
责任编辑:孙常长

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

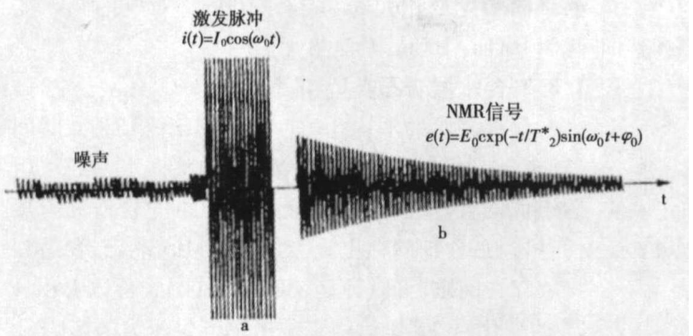


图 2　激发脉冲和 NMR 信号时序图

Figure 2 Timing sequence of exiting pulse and NMR signal

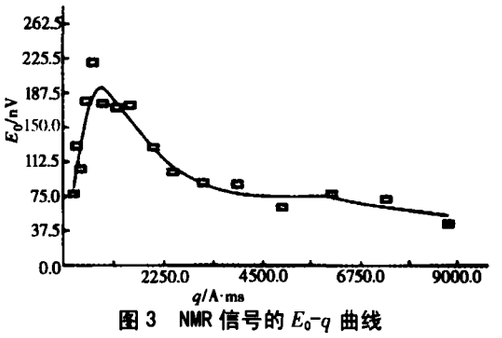


图 3　NMR 信号的 E_0–q 曲线

Figure 3 E_0–q curve sequence of NMR signal

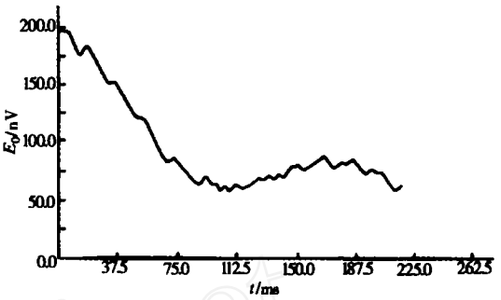


图 4　NMR 信号的 E_0–t 曲线

Figure 4 E_0–t curve sequence of NMR signal

NUMIS$^+$、NUMIS^{Lite} 系统可观测纵向弛豫时间 T_1。这些参数的变化直接反映出地下含水层的赋存状态和特征。

1.2.1 NMR 信号的初始幅值 $E_0(q)$

每个 NMR 测深点都有一条 NMR 信号 E_0 随 q 值变化而形成的曲线(NMR 测深曲线)，通常用 E_0–q 曲线(图 3)表示。对该曲线进行反演解释后就可得到该测深点探测范围内的某些水文地质参数：含水层的深度、厚度、单位体积含水量。初始振幅 $E_0(q)$ 的表达式为：

$$E_0(q)=\int_V \omega_0\beta_{1\perp}(r)M_0 f(r)\sin\left(\frac{r}{2}B_{1\perp}(r)q\right)\mathrm{d}V(r),\quad(3)$$

式中：V 是天线覆盖下的探测体积；r 是天线中心到微分单元的矢径；M_0 是质子的核磁化强度；$B_{1\perp}(r)$ 激发磁场垂直于地磁场的分量；$\beta_{1\perp}(r)=B_{1\perp}(r)/I_0$；$f(r)$ 是含水量。对于水平层状介质，电阻率的垂向分布已知，则初始振幅 $E_0(q)$ 表达式(3)变为：

$$E_0(q)=\int_0^L K(q,\rho(z),\alpha,z)f(z)\mathrm{d}z\quad,\qquad(4)$$

式中：K 是积分函数，与激发脉冲 q、岩层电阻率 ρ 及岩层埋深 z、地磁场倾角 α 有关。$f(z)$ 是含水量，$f(z)=V_F/V$，V_F、V 分别为探测体积内的自由水体积和探测体积。积分上限 L 是天线直径。将(4)式从地面沿 z 轴向下一维离散化，有如下矩阵形式：

$$[E(q)]_m=[M_{(z,q)}]_{m\times n}[f(z)]n\quad,\qquad(5)$$

式中：m 是激发脉冲个数，n 是岩层分层数。对于 $[M]_{m\times n}$ 矩阵，NUMIS 系统有专用的计算程序，一般为 16×16 矩阵，所需参数包括天线形状大小、激发场频率(拉摩尔频率)、地磁场倾角、激发脉冲个数、岩层分层数及各层电阻率。求解(5)式的反问题，即可获得含水量 $f(z)$。

1.2.2 NMR 信号平均衰减时间 T^*_2

每个激发脉冲矩 q 均可以得到一条 NMR 信号 E_0 随时间按指数规律变化的衰减曲线（E_0–t 曲线）(图 4)。由此曲线可以求出该 q 值探测深度内含水层的 T^*_2。T^*_2 值大小可给出含水层类型（平均孔隙度)的信息。T^*_2 的计算公式为：

$$T^*_2=\sum_{m=1}^{M}E_m^2/\sum_{m=1}^{M}\frac{E_m^2}{T_m}\quad,\qquad(6)$$

式中：Em、T_m(m=1,2,…,M)分别是某个激发脉冲矩 q_i 在 M 个时刻对应的 NMR 信号的振幅值、信号衰减时间。

国内外研究、统计规律表明，自由水和束缚水的 T^*_2 值是不同的，自由水的 T^*_2 变化范围：30ms<T^*_2<1 000ms。而束缚水的为 T^*_2<30ms。由于 NMR 找水仪的电流脉冲的间歇时间是 30ms，因此，NMR 找水仪接收不到束缚水的 NMR 信号。表 1 给出不同类型含水层的 T^*_2 值。

1.2.3 NMR 信号纵向弛豫时间 T_1

T^*_2 和 T_1 的测量技术不同，NUMIS 系统只能测出 T^*_2。T^*_2 是用一个激发脉冲矩的 E_0–t 曲线求得，而 T_1 是同一个记录点用脉冲序列测定的，即在使用 NUMIS$^+$ 和 NUMIS^{Lite} 系统时，在一个观测点上，用两个激发脉冲 q_1 和 q_2 进行测量，然后获得 T_1：

$$T_1=-\Delta t/\lg(1-E_0^2/E_0^1)\quad,\qquad(7)$$

式中：Δt 是两个激发脉冲 q_1

表 1　实测 T^*_2 值和含水层类型的近似关系

Table 1 Approximate relation between actual measured T^*_2 value and aquifer type

平均衰减时间/ms	含水层类型
<30	砂质粘土层
30~60	粘土质砂、很细的砂层
60~120	细砂层
120~180	中砂层
180~300	粗砂或砾质砂层
300~600	砾石沉积
600~1 000	地面水体

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和 q_2 的间隔时间，E_0^1、E_0^2分别是激发脉冲产生NMR衰减信号的初始振幅。$T^*_2<\Delta t<T_1$。T_1不受磁场不均匀性的影响，反映含水层的渗透系数。

1.2.4 NMR信号初始相位 φ_0

初始相位是二次场相对激发电流的相位移，由观测NMR信号衰减曲线实、虚分量的相位差确定。NMR信号的初始相位反映岩层的导电性，其特点是随着岩层导电性增强，φ_0值由小变大，当岩层不导电时，$\varphi_0=0$。

1.3 NMR测深方法的影响因素

任何一种物探方法均受自然存在的客观因素和人为技术因素的影响，只有了解这些因素影响的本质，才能很好地处理实测资料、识别异常，最终作出合理的地质解释。影响NMR信号的因素包括：岩层导电性、地磁场强度和倾角、含水层岩石类型和赋存状态、电磁噪声等自然因素及人为技术因素变化（如天线形状和大小、激发脉冲矩大小和个数等）。中国地质大学（武汉）的潘玉玲对此已有比较详细的研究成果，现将其结论介绍如下。

1.3.1 导电性

对于良导层(<10Ωm)位于含水层之上、之下和与含水层深度相同的三种情况下，位于含水层上方的良导层对NMR信号的影响最大，它使NMR信号明显衰减(低阻屏蔽效应)，导致探测深度和垂向分辨率的下降。上覆良导层的屏蔽效应对深处含水层NMR信号的影响比浅部含水层影响大得多，有可能漏掉深部含水层的信息。当岩层电阻率大于100Ωm，地面NMR找水方法更为适宜。

1.3.2 地磁场强度和倾角

从(3)式中可以看出，由于旋进频率 ω_0 和质子核磁化强度 M_0 均与地磁场强度 B_0 成正比，因此，NMR信号的初始振幅 E_0 与 B_0^2 成正比。对于地磁场强度在30 000nT(赤道附近)到60 000nT(南、北极)变化，则会引起NMR信号幅值四倍的变化。当在小测区范围内工作时，通常认为地磁场是均匀的，可不考虑其强度的影响。

地磁场倾角由两极的90°变到赤道的0°。磁倾角从大到小变化，使激发磁场的垂直分量 $B_{1\perp}(r)$ 减弱，进而使NMR信号幅值变小，导致NMR找水方法探测能力（深度）有所下降。但与岩层导电性对NMR影响相比，磁顷角影响要弱的多。

在火成岩地区找水时，往往在探测深度范围内存在磁性不均匀体，造成地磁场的不均匀性，使含水层的核磁矩围绕地磁场进动的角速度有差异，导致集中的磁矩产生扇形分散，从而加速磁化强度横向分量的衰减过程，这样使 T^*_2 变小。正常情况地磁场的垂向梯度变化大约为2nT/100m，对应的频率变化为0.1Hz/100m，对测量无影响。

1.3.3 含水层岩石类型和赋存状态

含水岩层的平均孔隙度大，NMR信号衰减时间长（表1），称为长信号含水岩石（如整体水、砾石、粗砂组成的含水层）；反之，衰减时间短的岩石称为短信号岩石（含细砂粘土）。对于NUMIS系统，发射和接收存在间歇时间（死区）30ms，从(2)式可以看出，T^*_2的变化对NMR信号衰减振幅产生较大的影响。

含水层埋深增大，NMR信号的初始幅值降低；含水层厚度大，NMR信号的初始幅值增强；NMR信号与含水层的含水量呈正比关系，这是由地面核磁共振找水方法直接找水的原理所决定的，是其它间接找水的物探方法不能比拟的。

1.3.4 电磁噪声

NMR信号的强度为nV级，因此易受电磁噪声的干扰。当电磁噪声增大时，NMR信号 E_0-q 曲线离散性增大，反演过程中实测曲线与理论计算曲线拟合差较大，导致反演结果出现偏差。对于NUMIS系统，根据信噪比适当增加数据采集叠加次数（表2）来抑制噪声，否则采用“8”字线圈，但有效探测深度减半。

表2 数据采集叠加次与信噪比关系

Table 1 Approximate relation between actual measured T^*_2 value and aquifer type

噪声	30nV	100nV	300nV
200nV	64	32	16
500nV	128	64	32
1 000nV	256	128	64

1.3.5 人为技术因素

根据探测目标的深度和工区电磁噪声的分布特点，天线形状可选择圆形、方形或“8”字形。天线布设的有效面积越大，NMR信号就大，则探测深度大，垂向分辨率增强。当采用“8”字形天线时，其纵对称轴应平行于线干扰源或使点干扰源位于其横对称轴上。

原则上激发脉冲矩愈大，探测深度亦愈大。但是，NMR测深是一种体积勘探，往往对深部的分辨力随深度加大而降低。若脉冲矩个数选择少了，垂向分辨力降低，(地下分层数与脉冲矩个数一样)；如果选择脉冲矩的个数太多，地质效果无明显改善且工效低。NUMIS系统一般选用16个脉冲矩。

1.4 NMR测深方法的技术特点

①该方法属于直接找水方法，在有效探测深度范围内，有水就有NMR信号显示，反之则没有。如岩溶发育区溶洞含水或被泥质充填时，电阻率法（间接找水法）测量结果均显示为低阻异常，难以区分。

②可量化含水层信息。通过对测量结果反演解释，即可确定含水层深度、厚度、单位体积含水量以

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及平均孔隙度等水文地质参数。

③由于观测的是二次场，受地形或地表局部不均匀体影响较小。

④该方法无需接地电极，适合西北地表干噪区使用。

⑤火成岩区磁性物质含量较高时，无法开展观测工作。

⑥由于观测信号为nV级，易受电磁噪声干扰。

⑦勘探深度较小，目前最大勘探深度小于150m。

⑧无法确定地下水矿化度变化特征。

⑨工作效率低下。如NUMIS系统采用16个脉冲矩，完成一个测点需3~6h。

1.5 NMR测深方法的应用范围

NMR测深方法属于直接找水方法，在有效勘探深度范围内，可探测各种类型地下水。考虑其运行成本和工作效率，该方法适宜于探测其它物探方难以寻找的地下水。

①黄土孔隙、裂隙水探测。

②寻找碎屑岩类浅层风化裂水和层间承压裂隙水。

③确定基岩构造裂隙带的富水性。

④判别灰岩区溶洞、裂隙含水或是泥质充填。

2 应用实例分析

鄂尔多斯盆地是一个以中生界为主体的大型沉积盆地，分为白垩系自流盆地区、周边岩溶区、东部黄土覆盖区三大部分。1999—2001年方法所承担了《鄂尔多斯盆地地下水勘查—水文地球物理勘探》项目(编号0299209030)，其中主要工作内容之一是选择鄂尔多斯盆地东部黄土覆盖区，开展核磁共振找水新技术试验研究。

试验区涉及神木、子州、绥德、清涧、延川五个县，在大地构造上属于华北地块鄂尔多斯台向斜的陕北台凹，褶皱和断裂不发育，未见岩浆侵入活动。研究区地层条件简单，上覆第四系黄土或砂、砾石层，下覆石炭—二叠系或三叠—侏罗系碎屑岩类。地下水类型主要包括松散层砂砾石孔隙水、基岩风化裂隙水、构造带裂隙水。

虽然试验区水文地质条件并不复杂，但电阻率法找水尚有一定难度。首先，下覆碎屑岩类浅层风化带与上覆地层电性差异不大，二者界面难以划分；其次，风化带的富水性和构造裂隙带含水段激电异常不明显，难以量化。有鉴于此，本次选择核磁共振找水试验点17个，均位于河谷内，取得了较好的效果。

2.1 子州县大理河河谷区试验结果

由于场地条件限制以及周围电力线的电磁噪声(>1000nV)干扰，激励线圈采用"8"字型，勘探深度小于50m。图5测量结果中，2~3m含水量19.9%，6~7m含水量22.8%，该两层反映第四系孔隙含水层特征。14.9~24.4m反映出基岩强风化裂隙水的含水层特征，往下至深度50m，含水量小于5%，反映基岩风化程度减弱，裂隙不甚发育，富水性变差。上述三个含水层的平均衰减时间T_2^*均小于100ms，说明含有一定的泥质或细砂成分。

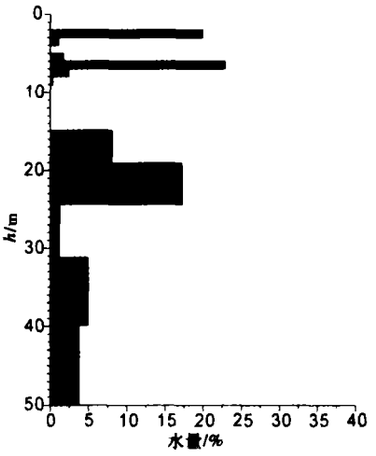


图5　子州县大理河河谷区一号廊道下游NUMIS测量结果

Figure 5 NUMIS measured results from No.1 gallery lower reaches, Dali River valley, Zizhou County

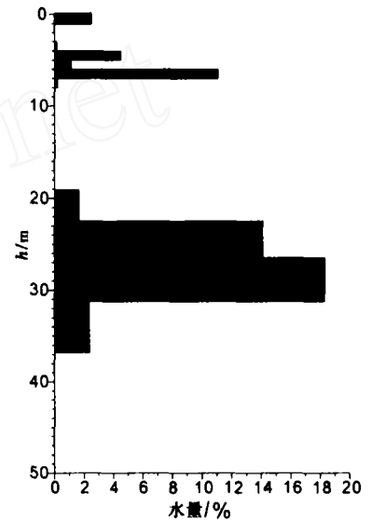


图6　绥德县无定河河谷区水厂取水点NUMIS测量结果

Figure 6 NUMIS measured results from intake of water works, Wuding River valley, Suide County

2.2 绥德县无定河河谷区试验结果

试验的目的是了解断层构造带的富水性，布设"8"字型线框长轴重叠于构造走向。图6为NUMIS测量结果。结果表明：浅层6~7m有一含水量为11.05%的含水层，其衰减时为216ms，反映其孔隙度大，补给条件好，水量丰富。22.5~37.5m之间含水层反映构造裂隙带富水层段，含水量为14.09~18.28%，衰减时253~408ms，说明该含水层裂隙发育，水量丰富。该孔具有较大的开采价值。

3 结语

地面核磁共振找水方法是目前世界上唯一的直接找水的地球物理方法。从文章的试验结果来看，在

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

探测碎屑岩类浅层风化裂隙水和构造带裂隙水方面具有明显的效果，可量化含水层深度、厚度、单位体积含水量以及平均孔隙度等水文地质参数，是其它物探手段无法比拟的。但有时辅以其它物探手段是很有必要的，如构造带空间产状的确定。该方法的弱点是易受电磁噪声干扰且勘探深度较小，目前最大勘探深度小于 150m，这也是未来方法改进的重要研究课题。

参考文献：

[1] 潘玉玲，张昌达.地面核磁共振找水理论和方法[M].武汉：中国地质大学出版社，2000.

[2] 丁次乾.矿场地球物理[M].北京：石油大学出版社，2002.

[3] 刘士毅主编.秦始皇陵地宫地球物理探测成果与技术[M].北京：地质出版社，2005.

[4] 赵运昌.中国西北地下水资源[M].北京：地震出版社，2002

Application of Surface NMR in Water Research and Its Effect

Cao Fuxiang[1,2], Li Fengzhe[2]

(1. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074; 2. Hydrogeological and Engineering Geological Techno-Methodology Institute, Baoding, Hebei 071051)

Abstract: To take a case study in loess covering area in eastern Ordos Basin as an example, introduced status quo of surface NMR technique used in water research and its basic principle, measuring parameters, influencing factors, technical features and range of application. Also illustrated results of the technique used in clastic rock shallow weathered zone fissure water and structural belt fissure water researches. As compared with other geophysical prospecting methods, this method can quantizing hydrogeological parameters of aquifer depth, thickness, volumetric water-bearing capacity and average porosity, thus make it capacious application prospect.

Keywords: NMR; direct look for water; weathered zone fissure water; structural belt fissure water; Application Effect

（上接第 10 页）

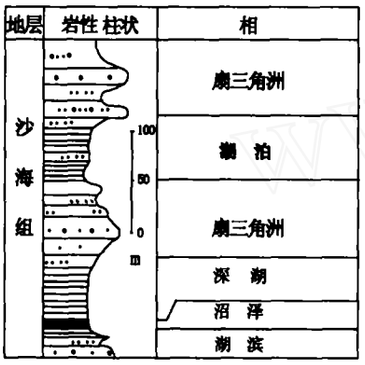


图 5 煤系垂直层序(878 孔)

Figure 5 No.878 borehole coal measures vertical sequence of strata

4 找矿预测

综上，长城窝堡井田沉积环境属于滨浅湖沉积类型；该井田沉积环境是在张强凹陷内部、受断层和长城背斜的影响，使该地区抬升所形成的沉积环境，由此推测，张强凹陷内的其它隆起地区以及凹陷的边缘地区（如大莫力克地区）也具备类似的沉积环境，这些区域均可能有煤系的赋存。此外，还可以在以下两个方向找矿。

①长城窝堡井田北侧及西南侧。北侧经勘察已发现煤层和丰富的油气资源；西南侧受同沉积断层 F_1 的影响，煤层位于正断层的上盘，煤层应较厚，但埋藏较深。

②根据本井田沉积环境演化过程，张强盆地内具有形成油气的湖泊相沉积条件。该井田的勘探资料也表明：以长城背斜轴部为中心，向四周油页岩有加厚的趋势，由此我们可以推测该井田外部区域油气前景可观。

参考文献：

[1] 马银起，等.辽宁省康平县长城窝堡煤矿勘探(精查)报告[R].东北煤田地质局 101 队、第一物测队，1992.

[2] 张振文.长城窝堡井田采后地应力变化及其对现有油田设施影响程度研究报告[R].辽宁工程技术大学，2004.

[3] 王万贵，程爱国.辽宁张强盆地聚煤与构造特征[J].中国煤田地质，2005，17(1):4-7.

[4] 曲国胜，周永胜，等.张强凹陷及邻区的构造应力分析[M].国家地震局地质研究所，1997,19(4):341-351.

[5] 曾伟.张强凹陷上侏罗统成岩作用及储层分布[J].西南石油学院学报，1996，18(4):9-14.

[6] 姚丹姝，程爱国，等.张强凹陷长北背斜原油分析[J].地质地球化学，1997，(4):57-62.

Depositional Characters and Prospecting Prediction in Changchengwopu Minefield

Liu Guoxing, Zhang Zhenwen and Feng Wenli

(Resource and Environment Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: After comprehensively studied regional geology, stratigraphy, sedimentary structure, paleontology and coal measures distribution in the Changchengwopu minefield, coastal and shallow lake sedimentary types and sedimentary environment evolution process were determined, that is the theoretical basis of coal seam hosting regularity, mine design and production, to tap the resources potentials. The paper predicted other possible coal-forming areas in the Zhangqiang Basin, provided new target areas for further exploration.

Keywords: depositional character; prospecting prediction; Changchengwopu minefield

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net