

瞬变电磁法在红柳园地区铀矿 勘查中的应用效果^①

赵希刚, 贺建国, 赵翠萍

(核工业 203 研究所, 陕西 咸阳 712000)

[摘要] 通过对红柳园地区瞬变电磁测量结果的分析, 结合地质、重磁等资料, 划分了测区盆地基底构造单元, 查明了找矿目的层的地层结构、埋深、厚度及空间展布特征, 解释了断裂构造。后期钻探验证表明, 所提供的测区深部地质资料准确可靠, 节省了大量的钻探工作量, 达到物探先行的目的。

[关键词] 瞬变电磁测量; 铀矿; 红柳园地区

[文章编号] 1000-0658(2009)04-0228-09

[中图分类号] P619.14; P631.3⁺25 **[文献标识码]** A

瞬变电磁法 (Transient electromagnetic methods) 是一种时间域电磁方法, 简称 TEM。瞬变电磁测量是基于岩性的电性差异, 利用不接地回线向地下发送一次阶跃波或电磁脉冲, 发送一次电磁脉冲的断电瞬间, 在地下形成涡旋交变电磁场, 测量这种由地下介质产生的二次感应电磁场随时间的衰减特性, 分析地下不均匀地质体的导电性能和位置, 从而达到探测识别不同电性差异地质体的目的。

瞬变电磁法的特点是: ①瞬变电磁测量具有不接地, 接收信息不受北方中新生代盆地气候干燥, 接地电阻大的地表风成沙、冲积物等软虚层的影响; ②剖面测量和测深工作同时完成, 提供了更多有用信息, 减少多解性, 工作效率高; ③可灵活选择测量频率

(2.5 Hz, 6.25 Hz, 25 Hz), 因为导电性好的低阻良导体瞬变曲线衰减慢, 穿透低阻层能力强, 勘探深度大, 随机干扰小; ④可以在远区观测、亦可以在近区观测、选择不同时窗进行观测; ⑤寻找低阻层效果明显; ⑥采用同点组合重叠回线进行观测, 使与探测目标的耦合最紧, 取得的异常响应强, 形态简单, 分层能力强^[1~5]。

1 工作区地质和地球物理概况

1.1 地质概况

红柳园地区位于华北板块阿拉善地块西缘与北祁连山褶皱带的过渡部位。测区位于合黎山和绿泉山之间的断陷带中, 潮水盆地西北部, 北大山和合黎山拱断带之间。

盆地基底是由前震旦系龙首山群 (Anzn)

^①基金项目: 由中央地质勘查基金项目《甘肃省红山地区铀矿普查》(编码 2007621012) 资助。

[收稿日期] 2008-02-21 **[改回日期]** 2009-06-11

[作者简介] 赵希刚 (1963-), 男, 高级工程师 (研究员级), 博士, 从事地球物理探测和信息技术的研究和生产。E-mail: zhaoxigang418@126.com

和北大山群 (Anzbd) 古老结晶变质岩系和河西-印支期花岗岩类 (γ_4) 组成的结晶地块, 即阿拉善地块西南缘部分。测区沉积盖层主要为中下侏罗统 (J_{1-2})、中新统 (N_1) 和第四系。中下侏罗统 (J_{1-2}) 主要分布在测区南部, 中新统 (N_1) 分布在测区北部。

测区构造以断裂为主, 主要构造线方向为北西西向和近东西向。北东向次级断裂晚期活动, 错断北西向断裂。

测区内铀矿化类型主要为砂岩型和泥岩型。主要赋矿层位为中上侏罗统青土井群, 该层位是一套以灰色为主的碎屑岩建造, 富

含有机质、含炭屑和黄铁矿等, 具备还原环境条件。

1.2 电性特征

1.2.1 地层的电性特征

统计结果表明, 工作区地层的视电阻率存在明显差异 (表 1), 主要分为 3 个电性层: ①视电阻率为 $10\sim 200\ \Omega\cdot m$ 且变化大的高阻层, 根据地表出露情况, 反映了近地表潜水面以上干燥松散砂砾层 (第四系)、或出露地表的中新统 (N_1)、或中下侏罗统 (J_{1-2}) 砂岩、泥岩互层特征。

表 1 红柳园地区地层视电阻率特征表

Table 1 The apparent resistivity feature of strata in Hongliuyuan area

地层时代	电性层	视电阻率/ $\Omega\cdot m$	特 征
中生代	Q	$10\sim 200$	变化大的高阻层
	N_1	$10\sim 100$	较稳定的低阻层
	J_{1-2}	$5\sim 50$	
前震旦系变质结晶基底和侵入岩	变质岩、花岗岩	>100	高阻层

注: 资料来源于玉门石油管理局和甘肃煤田物探队。

②视电阻率在 $5\sim 100\ \Omega\cdot m$ 之间较稳定的低阻层, 为潜水面以下中新统 (N_1)、或中下侏罗统 (J_{1-2}) 找矿目的层, 主要反映砂砾岩、泥岩互层夹煤层的含煤碎屑岩电性特征。

③视电阻率大于 $100\ \Omega\cdot m$ 的高阻层, 反映了前震旦系变质结晶基底或侵入岩, 岩性主要为深变质的砂岩、角闪岩、片麻岩、花岗岩及花岗闪长岩等。

1.2.2 岩石电性特征

统计分析测区的测井电性数据表明, 不同岩石的视电阻率存在明显差异 (表 2)。中下侏罗统青土井群的岩性粒度由小变大, 从泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩、粗砂岩到砂砾岩, 视电阻率数值由低变高, 其中的煤层和钙质砂岩, 视电阻率值最高。

总之, 地层和岩石的视电阻率参数变化特征说明, 测区的找矿目的层——中下侏罗统青土井群为较稳定的低阻层, 其中找矿目

表 2 红柳园地区中下侏罗统青土井群不同岩石物性参数统计表

Table 2 The apparent resistivity statistics of different rock from Qingtujing group of J_{1-2} in Hongliuyuan area

岩 性	视电阻率/ $\Omega\cdot m$
炭质泥岩	7.12
泥 岩	6.52
粉砂质泥岩	7.05
粉砂岩	6.80
细砂岩	7.01
中砂岩	7.54
粗砂岩	8.39
砂砾岩	9.24
钙质砂岩	10.39
煤	12.26

的层的不同岩性视电阻率存在差异, 这种特征不但为该区开展瞬变电磁测量提供了可能, 而且为资料解释提供了基本依据。

2.2 盆地构造基底构造单元划分

根据红柳园地区 TEM 测量的不同埋深地层的视电阻率平面图进行基底构造单元分析, 该区基底变化可划分为三隆夹两拗(图 2、表 3)。北部为慕少梁隆起, ZK352-8 附近称为慕少梁南拗陷, 主要地层为中新统 (N_1), 缺失中下侏罗统 (J_{1-2}), 基底埋深由南向北加深, 最深处在慕少梁山根, 中新统盖层厚度为 280 m (图 3)。中部三千米地段基底隆起是绿泉山花岗岩向东的延伸, 上覆薄层第四系, 局部可见花岗岩出露。绿泉山以南盆地

基底受北西向和北东向断裂影响, 形成红柳园拗陷(槽状断陷), 从视电阻率数据可以看出东、西部基底有差异。以 F_3 为界, 之西可细分为绿泉山南斜坡区、红柳园北凹陷、红柳园斜坡区, 基底呈向东逐渐加深的舌状断陷; 之东可细分为煤矿北阶梯状斜坡区、煤矿凹陷、中间凸起、山前凹陷、合黎山山前斜坡区, 基底变化从北到南逐渐加深, 呈北缓南陡的箕形, 据测量数据反演最大埋深在基线以南 55~59 勘探线之间, 深度大于 400 m (图 3)。

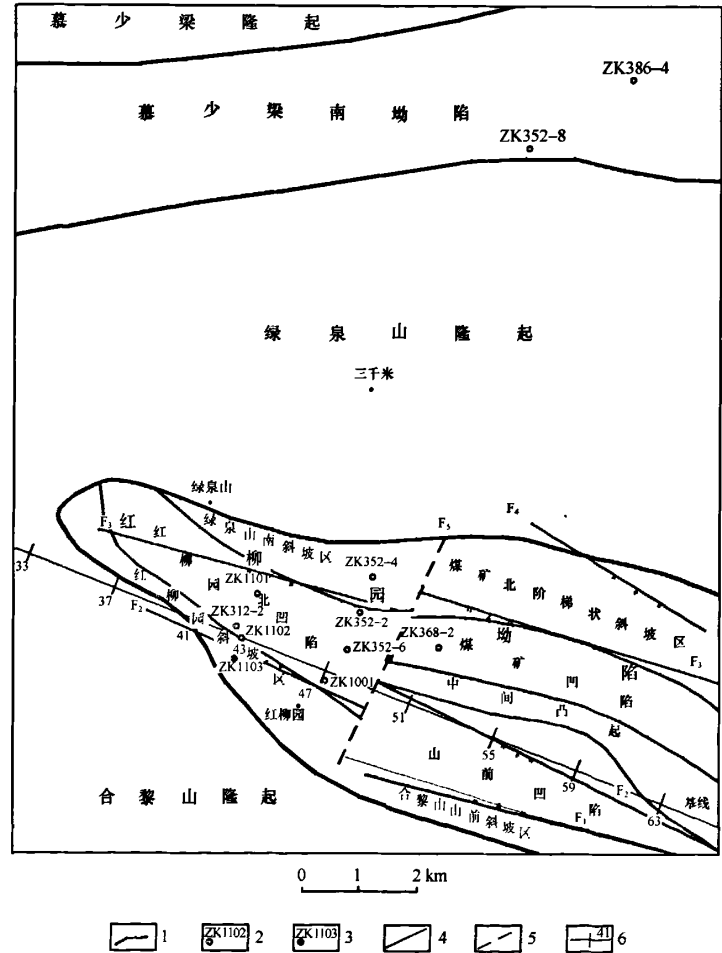


图 2 红柳园地区利用 TEM 测量数据解释盆地基底构造单元划分图

Fig. 2 The structure unit of the basin basement interpreted by TEM in Hongliuyuan area

1——隆起凹陷界限; 2——已施工孔; 3——异常孔; 4——断裂; 5——推断的断裂; 6——基线、测线及其编号。

表 3 红柳园地区盆地基底构造单元划分表
Table 3 The structure units of the basin basement
in Hongliuynan area

一级构造单元	二级构造单元
慕少梁隆起	
慕少梁南凹陷	
绿泉山隆起	
红柳园拗陷	绿泉山南斜坡区
	红柳园北凹陷
	红柳园斜坡区
	煤矿北阶梯状斜坡区
	煤矿凹陷
	中间凸起
	山前凹陷
	合黎山山前斜坡区
合黎山隆起	

2.3 地层的空间展布特征

(1) 地层的视电阻率断面特征

根据实测的岩性电阻率差异，建立了视电阻率与不同岩性的对应关系，在红柳园拗陷区划分了 5 个电性层，即近地表高阻层 A 层，视电阻率大于 $25\ \Omega\cdot\text{m}$ ，低阻层 B 层的视电阻率小于 $4\ \Omega\cdot\text{m}$ ，偏低阻层 C 层的视电阻率为 $4\sim 9\ \Omega\cdot\text{m}$ ，偏高阻层 D 层的视电阻率为 $9\sim 12\ \Omega\cdot\text{m}$ ，高阻层 E 层的视电阻率大于 $15\ \Omega\cdot\text{m}$ 。不同电性层与岩性对比关系、电性层的埋深、厚度及空间变化见表 4。

测区 47 号测线视电阻率断面南北长约 17.8 km (图 3)，南北均存在低阻区，反映中新统 (N_1)、或中下侏罗统 (J_{1-2})。而中部

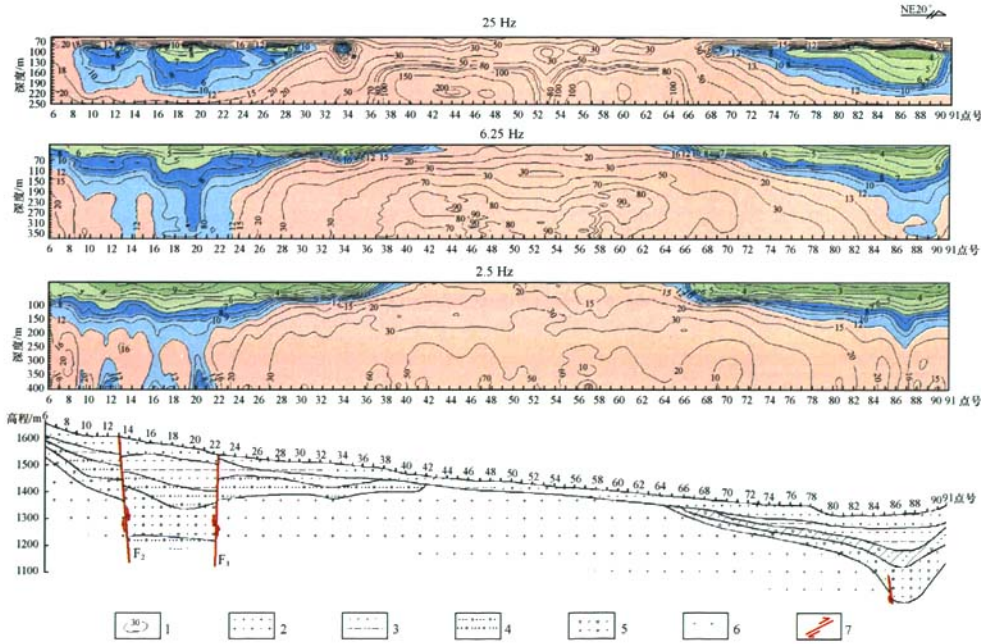


图 3 红柳园地区 TEM 测量 47 测线视电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$) 及解释断面图

Fig. 3 Apparent resistivity by TEM and interpreted section of Line 47 in Hongliuynan area

1——视电阻率等值线；2——近地表高阻层；3——泥质砂岩、粉砂岩；4——砂岩、含砾砂岩；5——钙质砂岩；6——基底（花岗岩）；7——推断的断裂。

(40~66 测点之间) 存在有大范围的稳定高阻区，反映盆地基底。近地表高阻区呈层状，主要反映潜水面以上的地层，厚度变化不大；低阻层在 6~40 测点之间，由两侧向中间加

厚，在 66~91 测点之间向北增厚，呈单斜。在 6~40 测点间的红柳园拗陷区，偏高阻层的视电阻率在 6.25 Hz 视电阻率剖面上呈漏斗型。在 66~91 测点之间的慕少梁南拗陷中，

表 4 红柳园地区利用 TEM 测量数据解释中下侏罗统青土井群剖面特征表

Table 4 The feature of mid-lower Jurassic Qingtujing group interpreted by TEM in Hongliuyuan area

电性分层	视电阻率值 / $\Omega \cdot \text{m}$	埋深、厚度及空间展布特征	岩性 (钻孔对比)
近地表高阻层 A	>25	厚 0~100 m, 连续	第四系、中下侏罗统青土井群上部 J_{1-2} (潜水面以上) 地表干燥层
低阻层 B	<4	埋深 0~100 m, 厚 10~35 m, 变化较平稳, 南北向中间增厚	中下侏罗统青土井群粉砂岩、泥岩
偏低阻层 C	4~9	埋深 10~130 m, 厚 90~300 m, 两侧向中间增厚, 最厚处在红柳园北凹陷	中下侏罗统青土井群砂岩、含砾砂岩
偏高阻层 D	9~15	埋深 130~350 m, 厚 60~170 m, 变化平稳, 向南稍增厚	中下侏罗统青土井群钙质砾岩
高阻层 E	>15	仅在近蚀源区基底急剧抬升, 分布广	致密坚硬砂岩、砾岩或基底岩性

低阻层和偏高阻层的视电阻率在 2.5 Hz 视电阻率剖面上呈向北倾的单斜层。

特别是在 2.5 Hz 视电阻率剖面图 (图 3) 上, 6~24 测点附近, 深 200~300 m 之间, 出现 12~20 $\Omega \cdot \text{m}$ 的不连续的透镜状高阻夹层, 根据视电阻率数据判断属致密的钙质砾岩引起, 不是基底花岗岩的反映。

中下侏罗统青土井群不同岩性的基本结构、空间展布形态及埋深和厚度变化见表 4。中新统 (N_1) 没有进行不同岩性细分, 这里不多叙。

(2) 地层的视电阻率平面特征

绿泉山隆起北部存在有一北陡南缓的浅近东西向低阻单斜层, 沉积中新统 (N_1)。绿泉山隆起南部为残留的中下侏罗统 (J_{1-2}) 青土井群, 平面上宏观表现为: 沿东西方向, 向西基本缺失, 向东逐渐增厚。在南北方向上, 两侧薄中间厚, 呈漏斗形。以断裂 F_5 为界, 之西由南向北增厚, 最深处靠近绿泉山山根。之东由北向南增厚, 受断裂构造的影响, 其空间展布形态和埋深呈向南的阶梯状, 最深处为东南部的山前凹陷区。

与 47 号测线视电阻率断面相近的 ZK312-2 钻孔, 施工是根据瞬变电磁的测量结果部署的, 钻孔地质编录与解释结果吻合性好, 特别是解释的基底深度及钙质砾岩层结果,

均得到了后期钻探 (ZK352-2、ZK352-4、ZK352-6、ZK352-8) 的准确验证。

而慕少梁南坳陷的低阻区为北倾的第三系单斜层 (已得到后期钻孔 ZK352-8、ZK386-4 的验证)。中新统盖层厚度从南到北逐渐增加, 约为 0~280 m。

2.4 断裂构造的解释与分析

根据瞬变电磁多测道电位曲线变化梯度带解释断层, 是基于断层两侧岩性差异导致电流变化, 从而引起电压变化, 测量电压沿剖面的变化规律, 就可了解断层的分布情况。断裂构造的解释是根据直立式倾斜的导电薄板的异常响应曲线形态特征而确定的, 在断裂构造倾斜一侧峰值大于另一侧, 峰值之比与断裂构造的倾角关系密切。在视电阻率断面图上, 视电阻率异常值在断层两侧形成明显差异。结合地质、重力场、航空磁场异常特征, 解释测区断裂构造。

分析红柳园地区所有测线的多测道电压曲线特征, 推断解释了该区断裂构造 5 条 (图 4、表 5), 以北西西向和北东向断裂为主。其中: 北西西向的断裂 4 条: F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ; 北东向断裂 1 条: F_5 。

红柳园地区主要由北西西向和一组北东向断裂构成了工作区内的基本构造格架 (图 2), 这两组断裂对测区内新生代盆地的形成、发

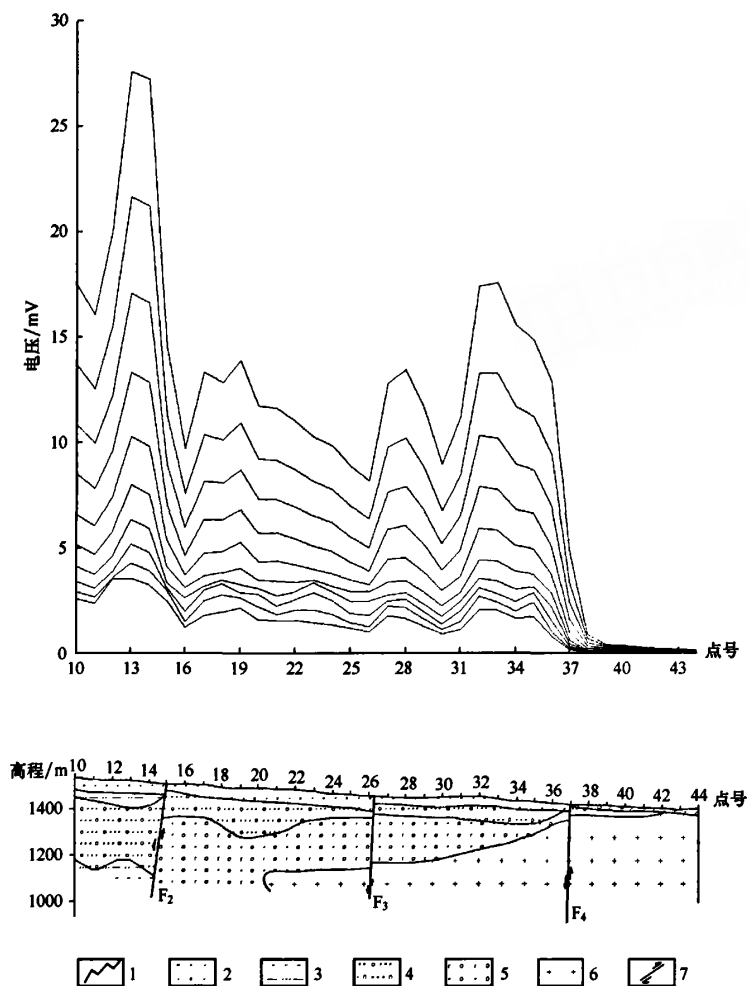


图 4 红柳园地区 TEM 测量 55 测线视电阻率 ($\Omega \cdot m$) 及断裂构造解释图

Fig. 4 Apparent resistivity and the interpreted fault structure of Line 55 in Hongliuyuan area

1——电压曲线；2——近地表高阻层；3——泥质砂岩、粉砂岩；4——砂岩、含砾砂岩；
5——钙质砂岩；6——基底（花岗岩）；7——推断的断裂。

表 5 红柳园地区利用 TEM 测量结果解释断裂构造一览表

Table 5 The interpreted faults with TEM in Hongliuyuan area

序号	编号	断裂名称	走向/倾向	长度/km	性质	备注
1	F ₁	合黎山前断裂	北西向/北	13.7	正断层、近直立	不同构造单元分界线
2	F ₂	红柳园北断裂	北西向/南	26.79	正断层、近直立	
3	F ₃	绿泉山南断裂	北西向/南	27.47	正断层、近直立	
4	F ₄	红柳园煤矿断裂	北西向/南	8.89	正断层	构造单元分界线
5	F ₅	红柳园北断裂	北东向	8.78	平移断层	

展、后期改造和地层的沉积与展布均具有明显的控制和影响作用。

(1) 北西西向断裂构造

北西西向断裂 (F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4) 分布于测区南部，其中 F_1 为区域性大断裂——山前断裂，也是合黎山与潮水盆地的分界线，断层性质为正断层。多测道电压曲线剖面和视电阻率断面图上断层近直立，断层北（下降盘）视电阻率低，反映基底凹陷，而断层南（上升盘）视电阻率高，反映基底隆起。其余断层也为正断层。该组断裂从北到南控制着中下侏罗统的沉积范围。这些断裂也位于重力场和磁力场的梯度变化带上。

(2) 北东向断裂构造

北东向断裂构造 (F_5) 分布于测区中部，多为平移断层。在视电阻率平面图（图 1）上，该断裂为地质单元分界线，以西为向东倾的中下侏罗统青土井群舌状沉积区，而以东为槽形构造区。该断裂为后期构造，错断北西西向断层。

2.5 TEM 测量解释与施工钻孔对比分析

通过 TEM 测量解释结果与施工钻孔 ZK1101 对比（表 6），可以看出除近地表高阻层相对误差大于 5% 外，其余误差均小于 5%，表明野外测量、室内数据处理及成果解释质量可靠。

表 6 红柳园地区 TEM 测量数据解释结果与 ZK1101 钻孔对比表
Table 6 The contrast between TEM interpret result and drill 1101 in Hongliuyuan area

TEM 测量电性层			地 层			相对误差
视电阻率/ $\Omega \cdot m$	解释深度/m	岩 性	钻孔深度/m	地层代号	岩 性	/%
>25	60	近地表高阻层	65	Q	冲洪积、砂砾岩	7.69
<4	90	泥质砂岩、粉砂岩	88	J _{1-2qn}	砂泥互层	-2.27
4~7	195	砂岩、含砾砂岩	193		砂岩、含砾砂岩	-1.04
7~12	>300	钙质砾岩	>300		钙质砾岩、泥岩、粉砂岩	

根据瞬变电磁测量结果，部署后期的钻探工作，其钻探地质编录的岩层（地层）展布范围、深度、岩性等都与瞬变电磁测量解释结果吻合较好，原设计 2000 余米的钻探工作量，仅用 1000 余米就达到了区域地质调查的目的，节约工作量近 50%。

3 结论及建议

通过瞬变电磁测量，结合地质、重磁等资料，基本查清了红柳园地区的基底起伏变化，划分了盆地构造单元，查清了红柳园地区的地层结构，分析了找矿目的层不同岩性的埋深、厚度及空间展布特征；解释了红柳园地区断裂构造 5 条，分析了断层性质。

建议下一步找矿工作重点应部署在红柳园地区合黎山山前斜坡区。该区段存在中下侏罗统青土井群，呈向北倾的较陡单斜层，

地面 γ 能谱测量合黎山花岗岩铀源条件好，地下水较为丰富，存在铀元素的微弱迁入，铀具有明显的异常中心，可投入少量的钻探工作进行探索。

[参考文献]

[1] 李 貅. 瞬变电磁测深的理论与应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
[2] 牛之琰. 时间域电磁法原理 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.
[3] DZ/T0187-1997, 地面瞬变电磁法技术规范 [S].
[4] 方根显, 杨建春, 杨亚新. 瞬变电磁法在古河道型砂岩铀矿找矿中的应用 [J]. 华东地质学院学报, 2003. 26 (4): 361~363.
[5] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度 [J]. 石油地球物理勘探, 2004. 39 (5): 575~578.

(下转第 252 页, Continued on page 252)

- [21] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [22] 潘自强. 核和辐射环境影响评价及有关评价中一些问题的探讨 [J]. 辐射防护, 1998. 18 (3): 167~174.

Radioactive environmental impact assessment for a highway construction project in Guangdong province

QIU Guo-hua

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the field environmental investigation and monitoring result, the radioactive environmental impact for a highway construction project in Guangdong province has been analyzed and assessed and forecasted.

Key words: radioactive environmental impact assessment; highway construction project; regulating dose limit

(上接第 235 页, Continued from page 235)

The application effect of TEM for uranium prospecting in Hongliuyuan area

ZHAO Xi-gang, HE Jian-guo, ZHAO Cui-ping

(Research Institute No. 203, CNNC, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: Transient electromagnetic method (TEM) is used to detect deep geological information in Hongliuyuan area for uranium prospecting. TEM surveying data is processed to divide structure units of basin basement, to analyse stratigraphic sequence and buried depth and thickness and spatial distribution of target layer and interpret structure. After examination with later drilling data, TEM is found be able to provide reliable deep geological data for prospecting uranium deposits.

Key words: TEM; uranium deposit exploration; Hongliuyuan area