广东龙门地区航空电磁场特征与地层单元划分

王卫平，方迎尧

(中国国土资源航空物探遥感中心，北京 100083)

[摘要] 文章以 2005 年广东龙门地区 1∶5 万比例尺的直升机航空电磁测量数据为基础资料，结合地质、航磁、地面重力等资料，建立了该区地层单元划分的地球物理标志，并对该区的地层单元进行了划分。通过与广东龙门地区地质图进行对比，发现与该图大部分吻合较好，并增加了上覆和下伏地层的岩性信息，以及若干新的地层单元。该项成果对于今后采用航空电磁法进行地质填图具有一定的参考意义。

[关键词] 航空电磁场特征；地层单元划分

[文章编号] 1000-0658(2008)04-0242-08 [中图分类号] P631.3+26 [文献标识码] A

众所周知，航磁资料对于圈定具有一定磁性的侵入岩体、火山岩以及变质岩效果较好，但由于大多数沉积地层呈无磁或弱磁性，利用航磁资料划分地层单元较困难。广东龙门地区 1∶5 万比例尺直升机航空物探勘查为电磁、磁综合测量。为了有效地利用航空物探资料，尽可能多地提取地质信息，通过分析该区航空电磁场特征与各时代地层的关系，认为不同时代地层的电磁场特征具有明显的差异，从而总结和归纳出了各时代地层的航空电磁场特征规律，并在综合分析的基础上，建立了该区地层单元的地球物理划分标志。据此将广东龙门地区划分为 66 个地质岩性单元，并编制了该地区地层单元分布图。通过与该区地质图进行对比，发现与该图大部分吻合较好，并增加了上覆和下伏地层的岩性信息以及若干新的地层单元，为该区研究区域构造和进行成矿远景预测提供了丰富的地质依据。

1 区域地质概况

广东龙门地区地层主要分布有上元古界震旦系，古生界寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系，中生界三叠系、侏罗系、白垩系及新生界等。侵入岩主要为燕山旋回第 3～5 侵入期，其中第 3、4 期以花岗岩类为主，第 5 期为花岗斑岩，沉积地层和岩浆岩的分布明显受构造控制（图 1），即沉积地层主要分布于龙门坳陷，岩浆岩主要分布于龙门坳陷的周围。

震旦系分布在测区南部及边部，为深变质岩类，岩性主要为混合花岗岩、片麻岩等。寒武系呈大面积分布在测区西部和西南部，为浅变质岩类，岩性主要为长石石英岩。

泥盆系、石炭系分布比较广泛，为海相

[收稿日期] 2007-04-09 [改回日期] 2008-03-10

[作者简介] 王卫平（1963-），男，高级工程师（研究员级），长期从事航空物探成果解释和方法研究工作。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

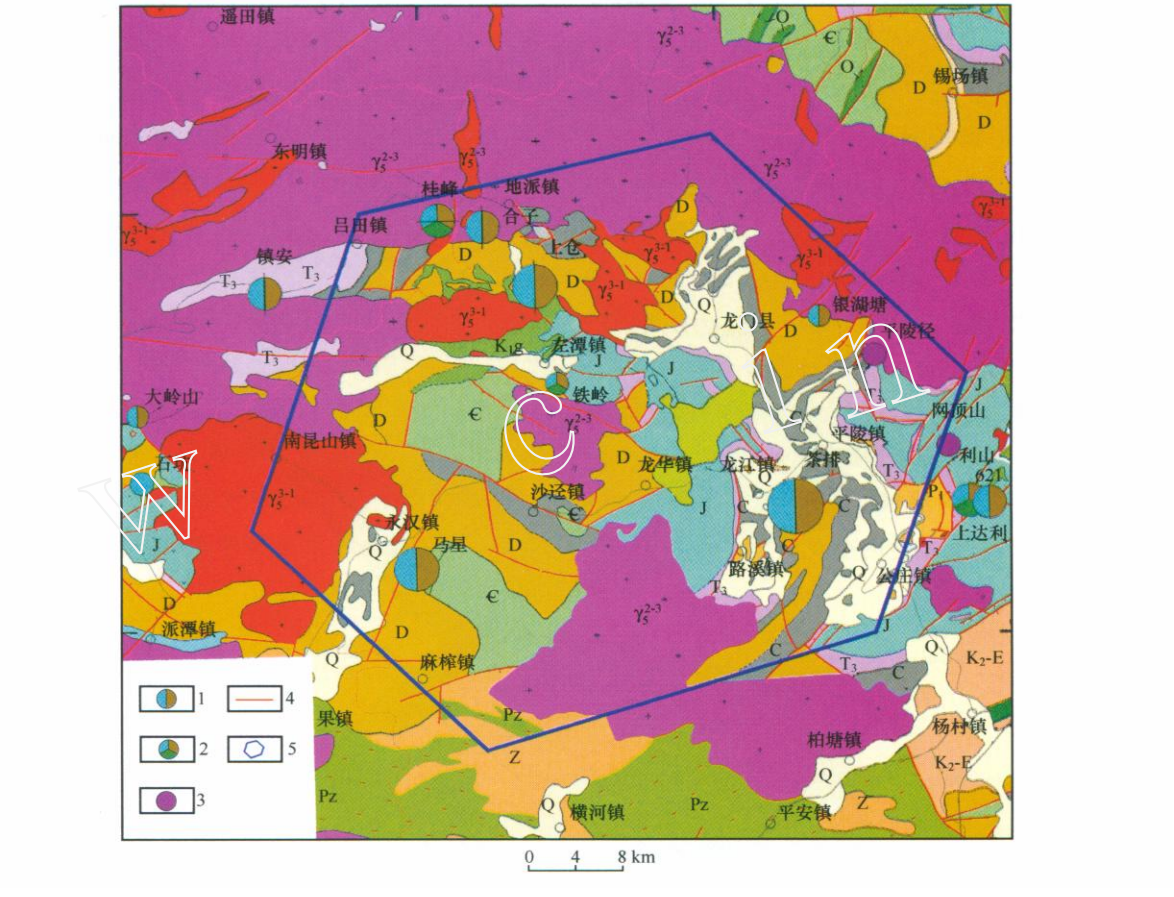

图 1　广东龙门地区地质矿产图

Fig. 1　Geological and mineral resource map of Longmen, Guangdong province

Q ——第四系；N ——上第三系；K_2-E ——上白垩统-下第三系；K_1g ——白垩系下统官草湖群；J ——侏罗系；T_3 ——上三叠统；P_1 ——下二叠统；C ——石炭系；D ——泥盆系；O ——奥陶系；∈ ——寒武系；Pz ——前寒武系；Z ——震旦系；γ_5^{3-1} ——燕山晚期花岗岩；γ_5^{2-3} ——燕山中期花岗岩；1 ——铅锌矿；2 ——铜铅锌矿；3 ——黑钨矿；4 ——断裂；5 ——测量区域。

沉积岩类，其中泥盆系岩性以粉砂岩为主，夹砾岩、页岩与石灰岩、泥灰岩夹砂页岩互层。石炭系为石灰岩夹砂页岩及白云岩。

二叠系呈小面积分布于测区南部，基本上属浅海相岩类，岩性为石灰岩、碎屑岩夹砂岩页岩；三叠系分布于测区中部，基本上以陆相沉积为主，岩性为含煤系碎屑岩、页岩、砂岩互层。

侏罗系主要分布在测区中东部，分布面积较广，以陆相火山岩系岩类为主夹陆相沉积岩类。下部岩性以陆相沉积岩、砂页岩夹煤层，上部岩性以火山熔岩、火山碎屑岩为主。

白垩系主要分布在测区中北部，为陆相沉积岩类，岩性以砂砾岩、石英岩为主。

第三系分布于测区中部，主要为砖红色、紫红色厚层状砾岩和砂岩组成的陆相碎屑岩建造。第四系主要分布在河谷地带，由砂土、砾石、砂质粘土等松散冲积物组成。

根据该区地层、岩石的电性特征可知，中生代花岗岩呈高阻特征，电阻率可达数千至上万欧姆米以上，大部分中生代沉积岩电阻率较高，电阻率为数百至千欧姆米以上，而且上述中生代花岗岩和中生代沉积岩在本区分布广泛，因此中生代花岗岩和中生代沉积岩可能形成大面积的平静电磁低背景场。第三系和第四系含水沉积物电阻率较低，一

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

般在 50～200 Ω·m 左右，可能形成明显的升高电磁场。

2 航空电磁场特征

该区电磁场总体表现为龙门—平陵地区的区域升高电磁场和其余地区的大面积区域降低电磁场，在此背景上叠加一系列北东、北西向局部电磁异常条带（图 2）。由航空电磁共面装置 930、4650、23250 Hz 实虚分量转化的视电阻率图[1]（图 3）与电磁场分布特征基本相似，但由于转换的视电阻率值基本消除了飞行高度的影响，视电阻率的变化基本上反映地下介质岩性的变化[2]。

龙门—平陵升高电磁场区在地质构造单元上对应龙门坳陷的东部，并与航磁场中的龙门-蓝田圩负磁场区的中南部基本对应。该电磁场区升高的原因主要是由大面积分布的第四系、第三系及其含水地层的反映，而且电磁响应频率特性从低频到高频均呈现升高的区域电磁场，实分量最小值基本上大于零值，说明本区地下介质磁性较弱，具有一定的导电介质特征，这与本区航磁 ΔT 磁场较为平静是一致的。由共面装置实虚分量转换的视电阻率图（图 3）可以看出，本区视电阻率值明显降低，视电阻率变化范围一般为 10～250 Ω·m，总体上呈现中等良导的介质特性。

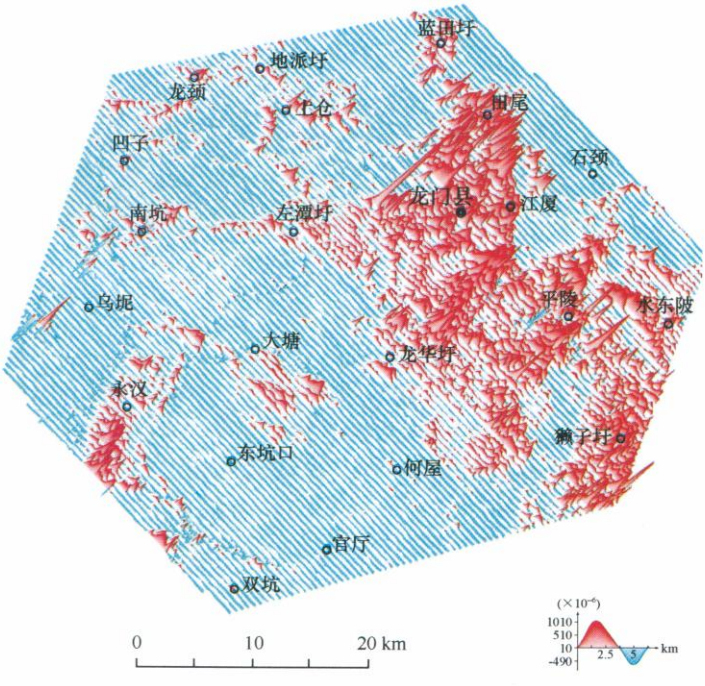

图 2 广东龙门地区直升机航空电磁 930 Hz 虚分量剖面平面图

Fig. 2 930 Hz quadrature profile plan map of helicopter electromagnetic survey of Longmen, Guangdong province

图中零线为 930 虚分量均值 10 ×10⁻⁶。

永汉升高电磁异常带在地质构造单元上对应壶口复背斜的南西翼和北东翼，区域电磁场升高的主要原因是第四系及含水破碎带的反映，并与航空磁场图[3]上的 2 条宽度较窄的航磁升高异常有对应关系的电磁异常带，可能为矿化蚀变带的综合反映。由共面装置实虚分量转换的视电阻率图可以看出，本区视电阻率变化范围一般在 30～250 Ω·m，总体上呈现中等良导的介质特性。其中第四系含水地层视电阻率范围为 30～120 Ω·m，含矿化蚀变带视电阻率范围 20～250 Ω·m。

石颈降低电磁场区在地质构造单元上位

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

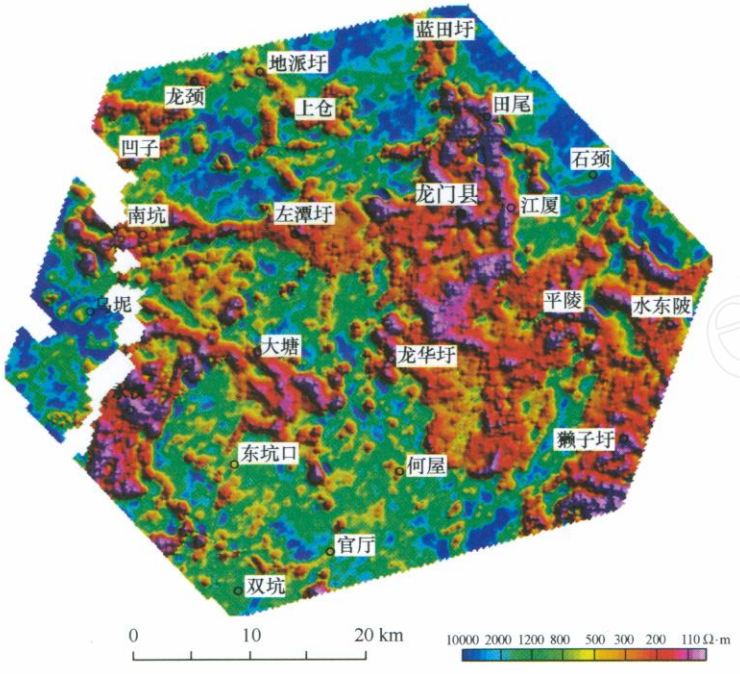

图 3　广东龙门地区 930 Hz 实虚分量转换视电阻率（Ω·m）图

Fig. 3　930 Hz apparent resistivity map calculated from in-phase and quadrature in Longmen of Guangdong province

于龙门坳陷的东北部，佛岗岩浆岩带的东部。在晚侏罗世中粗粒花岗岩分布区域，以平静、低缓的电磁场为主要特征，而且从低频到高频均呈现降低的电磁场特征，经计算视电阻率值变化范围为 2000 Ω·m 至数万欧姆米，呈典型的高阻介质特征。

凹子—地派圩降低电磁场区在地质构造单元上位于佛岗岩浆岩带上，在晚侏罗世中粗粒花岗岩分布区域，以平静、低缓的电磁场为主要特征，而且从低频到高频均呈现降低的电磁场特征，经计算视电阻率值变化范围为 3000～10000 Ω·m，呈典型的高阻介质特征。在沉积地层分布区域（如地派圩），电磁响应呈升高的带状分布，且电磁频率特性从低频到高频呈升高的趋势，其转换的视电阻率变化范围为 40～120 Ω·m，推测其为第四系及其含水地层的反映。

乌坭—左潭圩南低缓电磁场区电磁响应频率特性总体上从低频到高频均表现为降低的电磁场特征，说明本区地下介质呈相对高阻，其中南昆山岩体视电阻率最高达 5000～10000 Ω·m，桥头岩体视电阻率达 2000 Ω·m 以上，而在侏罗系、泥盆系分布区域视电阻率为 500～2300 Ω·m，局部视电阻率值降低可能与含水裂隙及矿化蚀变带有关。

东坑口—何屋低缓电磁场区在地质构造单元上位于壶口复背斜和沙帽岩体分布区。电磁响应频率特性总体上从低频到高频均表现为降低的电磁场特征，说明本区地下介质呈相对高阻，经计算视电阻率值在 1000 Ω·m 以上，认为西部为泥盆系、寒武系砂岩、粉砂岩的反映，东部为晚侏罗世细粒花岗岩的反映。局部相对低阻地段的电阻率范围为 100～500 Ω·m，可能为含水地下破碎带的反映。

3　地层单元划分标志

选择本区地质图中典型的沉积地层、变质地层分布区，分别与航空电磁各频率实虚分量剖面平面图、视电阻率平面图，并结合航磁、重力和岩石物性资料进行对比分析，通过归纳总结，建立本区地层岩性的地球物

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理标志，作为划分不同时代地层、岩性单元的依据。

航空电磁各频率实虚分量和其转换的视电阻率值对不同地层、岩性的反映具有一定的差异，从本区最老的震旦系（Z_1d）到第四系，各频率电磁实、虚分量均有一定的反映，即表现为电磁实虚分量的强度和视电阻率值的大小不同，且各频率电磁响应对同一地层的反映特征大致相同。而各频率视电阻率由于消除了飞行高度的影响，对不同地层的反映分辨率较高。值得说明的是，岩层中的含水量是地层单元划分的主要干扰因素。

航磁ΔT测量资料对本区不同岩浆岩体、断裂反映较好，分辨能力较强，但对不同的沉积地层反映较差，大多数沉积地层均呈无磁性反映，只有个别地层有微弱磁异常显示。

布格重力异常对本区沉积地层的反映程度则介于航空电磁与航磁资料之间。重力资料对该区具有一定规模的中酸性侵入岩体均表现出重力低特征。

依据测区内各类地层岩性与航空电磁、航磁和重力等异常场的对比、统计与分析，建立了以航空电磁资料为主的地球物理-岩性地质单元划分标志（表1），如下：

(1) 一般情况下，砂岩、砾岩、页岩类地层的电磁响应值较高，视电阻率低；碳酸盐岩类、石英岩类地层的电磁响应值低，视电阻率值很高。我们把沉积地层单元的岩性由地层符号的右下角标进行区分，s代表以砂岩、砾岩、页岩为主的地层单元，用h代表碳酸盐岩类为主的地层单元，用sh代表砂岩、页岩夹灰岩类或石英岩类的地层单元；如果岩性中夹有含铁锰质或炭质岩石时，则用st表示。所填岩性地层单元的时代，则参考了地质图上相应位置的地层时代。例如D_3sh表示是上泥盆统砂岩、页岩与灰岩互层的岩性地层单元。

(2) 下侏罗统、上三叠统和下石炭统的电磁响应变化较大，有时导电性较强，说明这类岩性地层单元中有局部导电性非常好的夹层存在。通过野外实地踏勘，该地层局部地段除夹有炭质页岩外还含铁锰质或铁帽。该地层右下角标表示为st，如J_1st、J_3st、C_1st等。

(3) 在泥盆系中，D_3sh和D_3h地层的电磁异常特征和视电阻率变化范围具有明显的差异，其原因尚未查明。推测D_3sh的两种不同表现可能是砂、页岩与灰岩所占比例不同造成的；而D_3h的两种不同表现则可能是灰岩与硅质灰岩所占比例的不同或纯度不同造成的。

(4) 在本区地质图（图1）中，震旦系Z_1d中存在古生代混合岩（Pzmi），经对比Pzmi与Z_1d地层的电磁场特征、航磁场特征和重力场特征完全相同，无法将它们区分出来。

4 沉积地层和变质岩岩性填图

依据广东龙门地区岩性地质单元划分标志（表1），将该区共划分出66个地质岩性单元，在各时代地层的分布见表2和图4。

由图4可以看出，据直升机航空物探资料推断的地层岩性单元分布图与地质图（图1）的总体轮廓基本相似，但某些局部信息更为丰富。例如，对埋藏较浅的花岗岩侵入体（如蓝田圩以北的花岗岩体）、泥盆系碳酸盐岩类岩层（如上仓南部泥盆系D_3sh）、硅质岩类岩层（如南坑东南的寒武系）以及第四系（如永汉一带的第四系）等岩性边界的划分比较细致；对某些下侏罗统砂岩夹有铁锰质或炭质页岩的地层也能清晰地划分出来（如水东陂北部一带的侏罗系J_1st）；另外还显示出隐伏岩体等信息（如上仓镇北东的C_1S/γ_{5R}^{3-2}表示上部为石炭系，下部为燕山晚期第2次侵入花岗岩）。这充分说明了应用直升机航空电磁测量资料进行地层单元划分的有效性。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　广东龙门地区地层岩性单元地球物理特征表

Table 1　Lithologic units and geophysical characteristics of strota in Longmen, Guangdong

编号	地　层	岩　性	符号	航空电磁场特征	航磁特征	重力场特征
1	第四系	砂土、砾石	Q	Re/ Im = 1，无规律变化异常区；ρ_s 大多在 150～300 Ω·m 变化；含水量多时导电性增强	无反映	无反映
2	上白垩统-下第三系	砾岩、砂岩	K_2-E	Re < Im，无规律变化异常区；ρ_s 一般在 100～150 Ω·m 变化；含水量多时导电性增大	无反映	无反映
3	下白垩统	凝灰岩	K_1s	Re、Im 均不大的平静场；ρ_s = 1000～2700 Ω·m，呈高阻	0～5 nT 弱异常区	无反映
4	下侏罗统	砂岩、粉砂岩夹炭质页岩及煤层，铁锰质结核	J_1st	Re > Im，Re 为尖峰异常，个别异常峰 Re ≫Im；ρ_s = 10～200 Ω·m，显示良导特征	无反映	无反映
5		砂岩、粉砂岩	J_1s	Re ≤Im，实虚分量为(10～15) ×10^{-6}之间无规律变化的弱异常区；ρ_s 一般在 150～500 Ω·m 变化	无反映	无反映
6	上三叠统	砂岩、石英砂岩、石灰岩	T_3s	Re ≤Im，呈相对平静的低缓电磁场；ρ_s = 500～1500 Ω·m，呈高阻特征	无反映	无反映
7		砂岩、石英岩、石灰岩夹炭质页岩及煤线	T_3st	Re ≤Im；ρ_s = 200～500 Ω·m，呈中等弱导电性	ΔT 垂向导数有弱异常显示	无反映
8	下二叠统	粉砂岩、砂泥岩	P_1s	Re < Im，实虚分量为(10～20) ×10^{-6}的异常变化区；ρ_s 为 150～500 Ω·m，呈弱导电性	无反映	无反映
9	下石炭统	砂页岩夹炭质页岩及煤层，铁锰质结核	C_1st	Re ≥Im，异常很强，Re 为尖峰异常，实虚分量最高达 400 ×10^{-6}；ρ_s = 10～80 Ω·m，表现为良导性	无反映	无反映
10		石灰岩、铁质砂岩、粉砂岩	C_1h	Re≈Im，实虚分量为大部分为(2～3) ×10^{-6}的低弱平静场；ρ_s = 500～10000 Ω·m，呈高阻特征	无反映	重力高
11		砂岩、泥岩、粉砂岩	C_1s	Re < Im，多在(10～30) ×10^{-6}范围变化；ρ_s = 100～500 Ω·m，呈弱导电性特征	无反映	无反映
12	上泥盆统	砂岩、页岩、石灰岩	D_3sh	Re ≤Im，实虚分量为(0～12) ×10^{-6}的小幅摆动平静场；ρ_s = 900～5000 Ω·m，呈高阻特征	无反映	重力高
13		石灰岩、硅质灰岩	D_3h	Re < Im，实虚分量在(10～20) ×10^{-6}范围变化；ρ_s = 250～1000 Ω·m，为高阻特征	无反映	重力高
14		砂岩、砂砾岩、粉砂岩、页岩	D_3s	Re≈Im，实虚分量为(0～10) ×10^{-6}的低幅度电磁场；ρ_s = 250～1000 Ω·m，为高阻反映	无反映	无反映
15	中下泥盆统	砂岩、页岩、石灰岩	$D_{1\text{-}2}sh$	Re > Im，实虚分量为(0～6) ×10^{-6}平静场；ρ_s = 1000～3000 Ω·m，为高阻特征	无反映	弱重力高
16		砂岩、砾岩夹页岩	$D_{1\text{-}2}s$	Re≈Im，实虚分量为(0～7) ×10^{-6}平静场；ρ_s = 500～1250 Ω·m，呈中高阻特征	无反映	无反映
17		石灰岩、钙质页岩	$D_{1\text{-}2}h$	Re≈Im，低缓平静场；ρ_s = 500～10000 Ω·m，呈高阻特征	无反映	无反映
18	寒武系	砂岩、页岩、板岩	Є	Re ≥Im，实虚分量为(0～10) ×10^{-6}的低幅电磁场；ρ_s = 500～1500 Ω·m，为高阻特征	无反映	相对重力偏高区
19	震旦系	片岩、千枚岩、变质砾岩夹白云岩、变粒岩	Z_1d	Re ≤Im，实虚分量为(0～9) ×10^{-6}的弱起伏电磁场；ρ_s = 1000～10000 Ω·m，呈高阻特征	无明显反映	重力偏高区
20	中酸性侵入岩体	各种花岗岩、石英岩、正长岩及斑岩类	γ	Re ≤Im，为(0～10) ×10^{-6}的低缓电磁场；ρ_s = 400～1500 Ω·m，为高阻特征	多为正负伴生异常	重力低
21	岩脉	中基性脉岩、蚀变脉岩	μ	Re < Im，实虚分量为(5～30) ×10^{-6}；ρ_s = 10～250 Ω·m	线性弱异常	无反映
22	蚀变岩	矽卡岩、角岩类	SK	Re≈Im，电磁响应为平静场，显示为弱良导性	强度 100～250 nT	无反映

注：Re 和 Im 分别表示航空电磁响应的实分量和虚分量。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

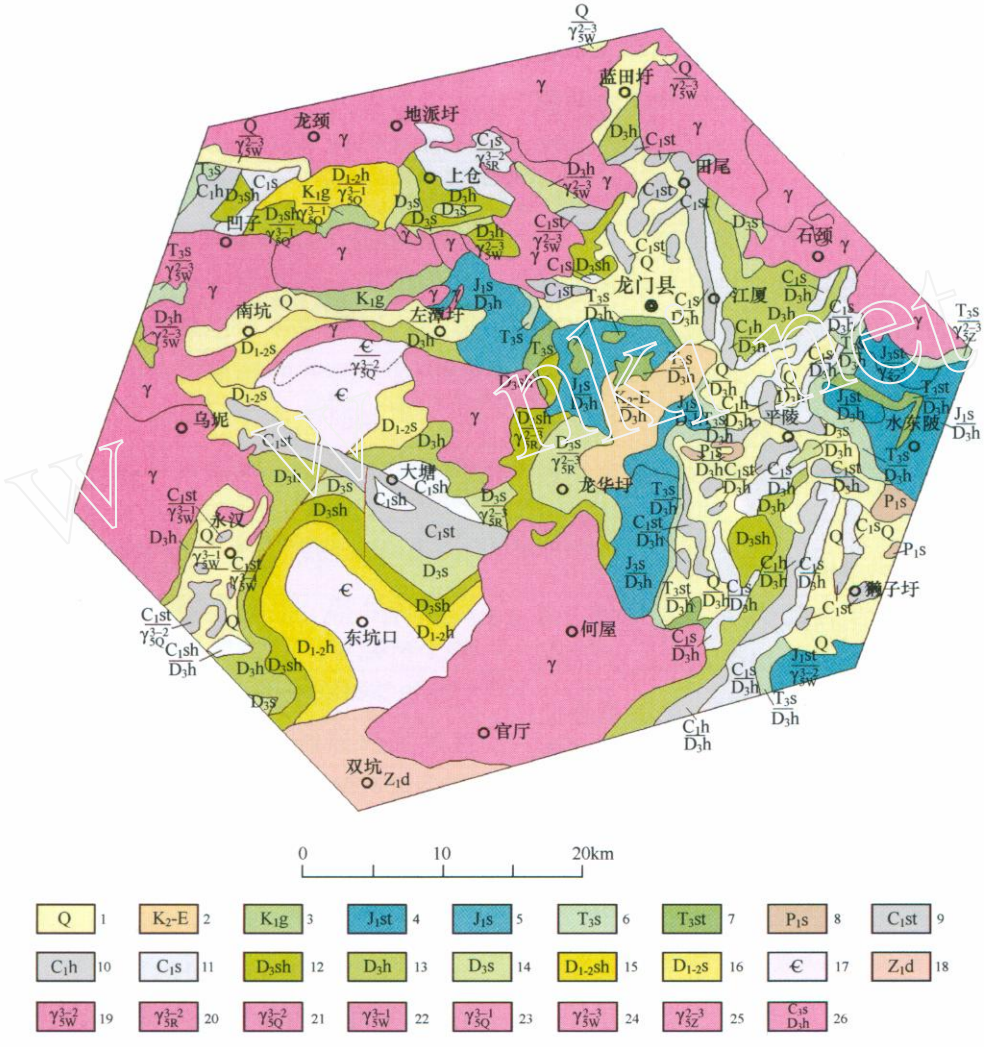

图 4 广东龙门地区根据直升机航空物探资料推断地层岩性单元分布图

Fig. 4 The distribution map of lithologic stratigraphic units from helicopter geophysical survey in Longmen of Guangdong province

1～18 ——推断的岩性地质单元，其符号参见表 1 中的相应说明；19～25 ——花岗岩类，下标 Q、Z、R、W 分别表示岩体为强、中、弱、无磁性；26 ——出露岩性地层单元（上）/ 被覆盖岩类单元（下）。

表 2 广东龙门地区地层岩性单元分布一览表

Table 2 The list of stratigraphic & lithologic units in Longmen of Guangdong province

地层	K_2-E	K_1g	J_1		T_3		P_1	C_1			D_3			D_{1-2}		€	Z_1
	K_2-E	K_1g	J_1s	J_1st	T_3s	T_3st	P_1g	C_1s	C_1st	C_1h	D_3s	D_3sh	D_3h	D_{1-2}s	D_{1-2}h	€	Z_1d
单元数	1	1	4	3	4	6	2	9	8	5	5	6	7	2	2	2	1
合 计	1	1	7		10		2	22			18			4		2	1

注：各地层岩性说明见表 1。

5 结论

(1) 通过分析认为，广东龙门地区不同时代地层具有不同的电磁场特征，总结和归纳出了各时代地层的航空电磁场特征，建立了该区地层岩性单元划分标志。

(2) 将广东龙门地区划分为 66 个地层岩

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性单元，并编制了广东龙门地区地层岩性单元分布图。该图件提供了上覆和下伏地层的岩性信息和若干新的地层单元，为该区研究区域构造提供了丰富的地质依据。

[参考文献]

[1] 王卫平，王守坦．直升机频率域航空电磁系统在均匀半空间上方的电磁响应与探测［J］．地球学报，2003. 24 (3)：285～288.

[2] Huang Haoping, Fraser, Douglas C. The use of quad-quad resistivity in helicopter electromagnetic mapping [J]. Geophysics, 2002. 67 (2): 459～467.

[3] 王卫平，等．广东河源地区直升机航空物探（电磁、磁）勘查成果报告［R］．中国国土资源航空物探遥感中心. 2006.

Characteristic of aero-electromagnetic field and the division of stratigraphic units in Longmen, Guangdong

WANG Wei-ping, FANG Ying-yao

(*China Aero Geophysical Survey & Remote-Sensing Center for Land Resources, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Based on the data of helicopter electromagnetic survey with the scale of 1∶50000 in Longmen, Guangdong in 2005, and combined with the geology, aero-magnetic survey, ground gravitational survey, etc., this paper first sets up the geophysical indication for the divistion of stratigraphic units, and then divides the stratigraphic units in this area. Compared with the geological map of Longmen, Guangdong, most divisions units between them coincide well, and some information of rocks at different depths and new stratigraphic units is added to the map. This achievement will help the geological mapping by using aero-electromagnetic method for the future.

Key words: characteristic of aero-electromagnetic field; division of stratigraphic units

---

(上接 241 页, Continued from page 241)

Application of multiple correlation analysis method to the prognosis and evaluation of uranium metallogenisys in Jiangzha region

ZHU Hong-xun[1,2], PAN Hong-ping[2], JIAN Xing-xiang[1]

(1. *Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan* 610059, *China*; 2. *Geology Bureau of Sichuan Nuclear Industry, Chengdu, Sichuan* 610021, *China*)

Abstract: Prognosis and evaluation of uranium resources in Jiangzha region, Sichuan province are carried out through the multiple correlation analysis method. Through combining the characteristics of the methods and geology circumstance of areas to be predict, the uranium source, rock types, structure, terrain, hot springs and red basin are selected as estimation variable (factor). The original data of reference and predict unit are listed first, then correlation degree is calculated and uranium mineralization prospect areas are discriminated finally. The result shows that the method is credible, and should be applied to the whole Ruoergai uranium metallogenic area.

Key words: multiple correlation analysis method; correlation degree; uranium mineral resources; prognosis and evaluation

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net