

# 南水北调西线一期工程阿坝段深埋长隧洞 CSAMT 地球物理勘探分类分析

柴建峰<sup>1</sup>, 伍法权<sup>1</sup>, 茅均标<sup>2</sup>, 刘彤<sup>1</sup>, 陶波<sup>1</sup>, 晏长根<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 南水北调西线一期工程位于青藏高原东部边缘地带, 地质条件复杂、断层密集分布、褶皱强烈发育。通过 CSAMT 物探进行前期工程地质勘察。依据区域地质条件、岩石电性特征和岩层的沉积环境, 按电阻率的高低范围及变化特征将 40 km 长的 CSAMT 电阻率断面图分为 4 种类型, 分别占测线总长的 54.75%, 38.75%, 3.75%, 2.75%, 各种类型反映不同的地质情况, 依次为: (1) 大范围的高阻区, CSAMT 电阻率断面图结构变化疏缓,  $\rho$  为 2 000~10 000  $\Omega \cdot m$ ; (2) 电阻率从地表向地层深处呈减小趋势,  $\rho$  为 1 000~50  $\Omega \cdot m$ ; (3) 电阻率从地表向地层深处呈变大趋势,  $\rho$  为 50~10 000  $\Omega \cdot m$ ; (4) 条带状低阻区,  $\rho < 300 \Omega \cdot m$ 。结合现场地质考察, 地质解译为: 类型 1, 3 的高阻区为砂板岩互层地层, 地下水不富集, 岩体结构完整, 工程地质条件简单; 类型 2 反映了该区深部岩体富水性和透水性比浅表地层好, 大范围的低阻与构造作用无明显联系, 由岩性和地下水条件决定的, 虽呈低阻, 仍为工程施工优良工段。对工程稳定性有危害的为类型 4 反映的由断层及其影响带所引起的条带状低阻区。

**关键词:** 岩土力学; 可控源音频大地电磁法; 电阻率; 断层; 地下水; 深埋长隧洞

**中图分类号:** TU 457; O 319.56

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)17 - 3094 - 07

## CLASSIFIED ANALYSIS OF CSAMT SECTION IN EMBEDDED TUNNEL EXPLORATION AT ABA SECTION OF FIRST STAGE OF WEST LINE PROJECT OF SOUTH-TO-NORTH WATER TRANSFER

CHAI Jian-feng<sup>1</sup>, WU Fa-quan<sup>1</sup>, MAO Jun-biao<sup>2</sup>, LIU Tong<sup>1</sup>, TAO Bo<sup>1</sup>, YAN Chang-gen<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The first stage of the west route project of the South-to-North Water Transfer, which diverts water from the upper Yangtze River into the upper Yellow River, is located in the east edge of Qinghai—Tibet Plateau where the regional geological conditions are very complex. Active faults are distributed over the project zone, and strata are strongly folded. Through CSAMT exploration, the distribution of faults and groundwater are qualitatively analyzed; and the stability of embedded is evaluated. According to regional geology background, sedimentary rock modes and condition and physical features of rocks, the characters of CSAMT section to explore the strata structure, fault and groundwater condition are analyzed. The CSAMT section is classified into 4 types, accounting for 54.75 percent, 38.75 percent, 3.75 percent, 2.75 percent respectively in the 40 kilometer long surveying line. Each mode reflects different geological condition. For type 1 with wide high resistance area, CSAMT section changes sparsely and gradually,  $\rho$ : 2 000 - 10 000  $\Omega \cdot m$ . Type 2, wide low resistance area, CSAMT section also

**收稿日期:** 2005 - 02 - 24; **修回日期:** 2005 - 03 - 17

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412701)

**作者简介:** 柴建峰(1977 - ), 男, 2000 年毕业于吉林大学环建学院工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事工程地质方面的研究工作。E-mail: jfchai@mail.igcas.ac.cn。



changes sparsely and gradually, but the resistance reduces from the ground surface to deep zone,  $\rho$ : 1 000 - 50  $\Omega \cdot m$ . For type 3 with wide high resistance area, the resistance increases from the ground surface to deep zone,  $\rho$ : 50 - 1 000  $\Omega \cdot m$ . For type 4 with low resistance strip,  $\rho < 300 \Omega \cdot m$ . The geological interpretation is that the wide high resistance area(type 1 and type 3 ) reflects that the groundwater is not abundant in the sandrock and slate stratum. The large region of low resistance anomaly(type 2) reflects the hydraulic permeability and water reservoir of deep rocks are better than the superficial rocks. Low resistance anomaly depends on ground water conditions and lithologic characters, not on tectonic movement. Sandrock filled with water may appear low resistance anomaly. According to groundwater condition, when the tunnel is excavated, these low resistance anomaly made of moderate to thick-bedded sandrock may cause water gushing but the amount of water which may affect the safety of tunnel is not much. The low resistance strip (type 4)which reflects fault and its crushed belt will affect the excavation of tunnel.

**Key words:** rock and soil mechanics; CSAMT; resistance; fault; groundwater; long embedded tunnel

# 1 引言

南水北调西线一期工程深埋长引水隧洞将穿过黄河与长江两大水系最初分水岭巴颜喀拉山区(图 1), 巴颜喀拉山位于青藏高原的 EN 缘, 具有复杂的地形地貌、岩性和区域构造背景, 由海陆相交错沉积的三叠系巴颜喀拉群组成, 岩性主要是灰绿色长石质硬砂岩、板岩, 复式褶皱和断裂构造较为发育<sup>[1]</sup>。构造断裂与破碎带的存在是制约深埋长隧洞工程成败的关键地质因素之一。为此, 对隧洞通过区进行地球物理勘探、工程地质勘察, 并进行综合解释以查清影响工程建设的不良地质体、不良地质构造及地下水情况是十分必要的。

可控源音频大地电磁法(controlled source audio-frequency magnetotelluric, 以下简称 CSAMT)具有

勘探深度范围大、分辨能力强、观测效率高, 兼有测深和剖面研究双重特点, 是研究深部地质构造的一种有效手段<sup>[2]</sup>, 广泛应用于地下水勘察、煤田陷落柱、坝体渗漏、地下构造及富水岩体分布等工程物探中<sup>[2, 3]</sup>。本文结合区域地质、岩石电性特征及水文地质条件分析阿坝段 CSAMT 物探成果, 搞清不同类型电阻率地质成因及其反映的地质条件, 定性评价对拟建引水隧洞稳定性的影响。物探测线位置见图 1, 该段隧洞长约 40 km, 直径 10 m 左右, 埋深为 300~800 m。

# 2 区域概况

## 2.1 地貌及地质概况

测区地处巴颜喀拉褶皱带, 高程多在 3 700 m 以上, 以拉日绒雪山为界, 两侧地貌及水系迥然不

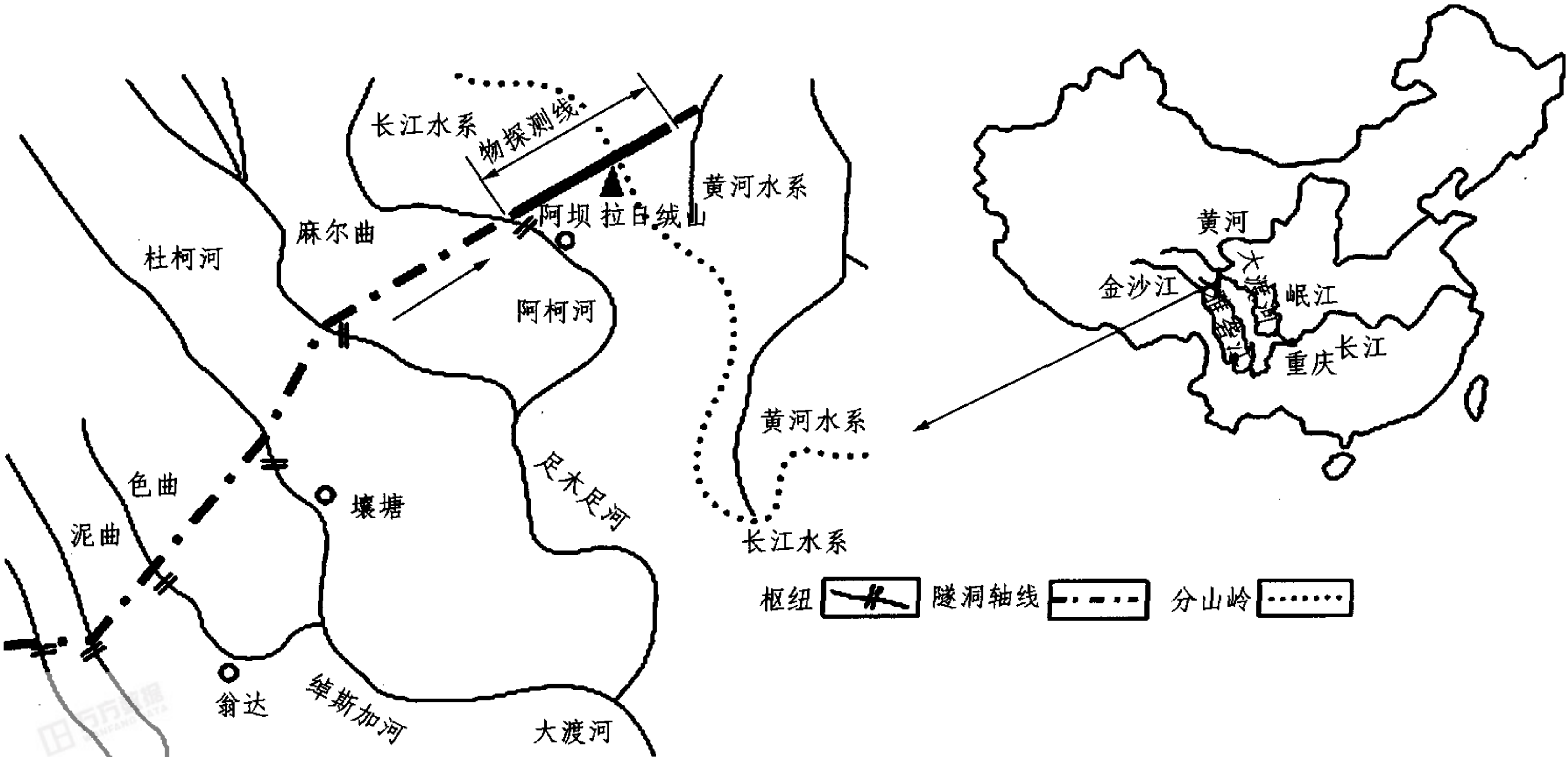


图 1 CSAMT 物探测线位置图  
Fig.1 Location of CSAMT exploration line



同,以西为黄河水系,沟谷表现为典型的“U”型谷特征,地形相对平缓,河流流速缓慢,沼泽草地发育;拉日绒山以东为大渡河流域,谷地为“V”型谷,河流湍急,属于深切割的高山和极高山区,外动力地质现象发育。测区褶皱发育呈现紧闭状,岩层大多陡倾,倾角多为  $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。地层主要为三叠系地层,即杂谷脑组  $T_3z$  和扎尕山群  $T_2zg$ ,其中  $T_3z$  为深灰色,以褐灰色厚层状凝灰质长石石英砂岩为主,薄-中层状凝灰质粉砂岩,深灰色板岩次之的砂板岩组合; $T_2zg$  为浅黄灰色、灰色薄-中层状岩屑亚长石砂岩、凝灰质岩屑长石砂岩,夹深灰色板岩褐微晶灰岩。同时分布第三纪构造盆地和第四纪冲、洪积及冰水堆积盆地<sup>[1]</sup>。

## 2.2 水文地质

地下水类型主要为<sup>[1]</sup>:松散岩类孔隙水、风化带网状基岩裂隙水、构造裂隙水。地下水的来源主要是大气降水,地表水系发育,每年的 5~10 月份为雨水充沛季节,约占全年降水量的 85%~90%之多。松散沉积物分布于河流、沟谷的漫滩和阶地,与地表水水力联系密切,地下水埋深一般为 2~5 m。风化带网状基岩裂隙水多为潜水,由于植被发育,大气降水入渗条件和水循环较好。构造裂隙水的含水量与构造裂隙发育程度、地表径流条件有关。

## 3 物探简介及工程区岩石的电性特征

### 3.1 CSAMT 简介

可控源音频大地电磁测深(CSAMT)是 1975 年由 Myron Goldstein 提出<sup>[2]</sup>,并在 1978 年由美国的 Zonge 工程研究公司发展成为有用的工具,近些年随着方法理论和仪器的发展,该技术已成为工程物探领域普遍使用的工具。CSAMT 采用可控人工场源,测量是由电偶极源传送到地下的电磁场分量,2 个电极电源的距离为 1~2 km,测量是在距离场源 5~10 km 以外的范围进行,此时场源可近似为一个平面波,通过不断变化电磁场频率,达到电阻率测深的目的。通过测量电场与磁场的水平分量求取地下介质的电阻率。

CSAMT 基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出的水平电偶极源在地面上的电场及磁场公

式:

$$E_x = \frac{IAB\rho_1}{2\pi r^3}(3\cos^2\theta - 2) \quad (1)$$

$$E_y = \frac{3IAB\rho_1}{4\pi r^3}\sin 2\theta \quad (2)$$

$$E_z = (i-1)\frac{IAB\rho_1}{2\pi r^2}\sqrt{\frac{\mu_0\omega}{2\rho_1}}\cos\theta \quad (3)$$

$$H_x = -(1+i)\frac{3IAB}{4\pi r^3}\sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0\omega}}\cos\theta\sin\theta \quad (4)$$

$$H_y = (1+i)\frac{IAB}{4\pi r^3}\sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0\omega}}(3\cos^2\theta - 2) \quad (5)$$

$$H_z = i\frac{3IAB\rho_1}{2\pi\mu_0\omega r^4}\sin\theta \quad (6)$$

式(1)~(6)中: $I$ 为供电电流强度, $AB$ 为供电偶极长度, $r$ 为场源到接收点之间的距离。

将式(1)沿  $x$  方向的电场( $E_x$ )与式(5)沿  $y$  方向的磁场( $H_y$ )相比,并经过一些简单运算,就可获得地下的视电阻率( $\rho_s$ )公式:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \quad (7)$$

式中: $f$ 为频率。

由式(7)可知,只要在地面上能观测到 2 个正交的水平电磁场( $E_x$ ,  $H_y$ )就可获得地下的视电阻率  $\rho_s$ 。

又根据电磁波的趋肤效应理论,导出了趋肤深度公式:

$$H \approx 256 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (8)$$

式中: $H$ 为探测深度, $\rho$ 为电阻率。

由式(8)可知,当地表电阻率固定时,电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比。高频时,探测深度浅;低频时,探测深度深。可以通过改变发射频率来改变探测深度,达到频率测深的目的,向下的穿透深度可达 2~3 km,有关 CSAMT 的基本理论和应用在文[2]中有更详细的介绍。

与其他工程物探方法相比,CSAMT 法具有勘探深度大、勘探深度不受布线长度的限制、数据采集自动化程度高、受地形影响相对较小、工作效率高等优点,其缺点是仪器设备较为笨重,需要的工作人员较多。



3.2 工程区岩石的电性特征

CSAMT 属于电磁类勘探方法，其解释基础是电阻率，在工程物探中用电阻率值的高低及分布形态来区分岩性，发现断层、断层充水情况及物质成分。地层的电阻率更多的还受岩体破碎程度和含水状况的影响，如层理和节理发育的砂岩如果富水电阻率将大大降低。板岩中砂质成分增加电阻率会相应增加，而泥质成分的增加则导致电阻率大幅度的降低。断裂、破碎带由于导水、充水，一般为低电阻率异常。本次工作区主要为沉积岩地层，以砂岩、板岩为主，及少量灰岩。第四纪堆积物由于结构疏松，孔隙大，如果和地表水关系密切，则电阻率比较低，为 $(10^1\sim10^2)n\ \Omega\cdot m$ 。灰岩电阻率由于受地下水溶蚀作用不同而变化较大。根据实测同时结合前人的成果，给出测区内岩石的电性特征，见表 1，依据表中岩石电阻率的界线，进行资料分析及地质推断解释。

表 1 测区岩石电阻率值<sup>[3~5]</sup>

Table 1 Resistance values of rocks in the survey area<sup>[3~5]</sup>

岩石名称	电阻率/ $(\Omega\cdot m)$
第四纪覆盖层	$(10^1\sim10^3)n$
砂岩	$(10^2\sim10^4)n$
板岩	$(10^2\sim10^3)n$
灰岩	$(10^2\sim10^4)n$
岩体破碎带或断层带	$(10^1\sim10^2)n$

4 CSAMT 异常分析

通过以下基本原则来分析 CSAMT 电阻率断面图来推测地下岩层及地下水特征<sup>[2, 6]</sup>：

(1) 电阻率断面图上等值线突变带一般对应为断层带发育、岩性分界线或中厚层砂岩破碎带。断层带及厚层砂岩破碎带由于富水表现低阻异常，

而板岩由于变质作用，泥质物质含量较高，亦呈现低阻现象，但其低阻异常要远小于前者，结合野外考察可以推断异常带为断层、破碎带或岩性分界线。

(2) 地表由于新生代沉积物覆盖或者强风化带物质、岩体裂隙发育而富有一定的地下水，故呈现低阻。在构造活动不明显的地区，电阻率从上至下增大，反映深部岩体完整性优于上部，裂隙发育减弱，地下水富集程度不如浅表层。

反之，如果电阻率从上至下减小，则表明该区深部岩层透水性和富水性优于浅表层，或者深部构造活动明显。

(3) 延伸到地层深处呈条带状的低阻带，且电阻率断面图结构呈现突变现象，一般对应为断层或破碎带发育位置，可结合周围电阻率等直线图形态及地质测绘资料推测其深部特征。

根据以上原则，考虑区域地质、岩石电性特征及地下水条件将阿坝段 CSAMT 物探成果，按电阻率断面变化特征将测线分为 4 种不同类型，这 4 种类型在隧洞勘察线路中所占的比例见表 2。以下将定性分析这 4 种类型的地质成因及其对拟建引水隧洞施工的影响。

4.1 由岩性和水文地质条件控制的大范围高阻区

在 CSAMT 探测深度范围内均呈现高阻， $\rho > 1\ 000\ \Omega\cdot m$ ，多为  $3\ 000\sim5\ 000\ \Omega\cdot m$ ，电阻率断面图结构变化疏缓(图 2)。地表高程一般为  $3\ 700\sim4\ 200\ m$ ，在地貌上表现为远离河谷，或地表水系不发育。岩性为中厚、中薄砂岩夹板岩，砂岩和板岩厚度比约为  $10:1$ ，板岩片理化较严重，可见少量灰岩，厚度约为  $5\sim10\ cm$ 。岩层产状近乎直立，在  $210^\circ\sim250^\circ\angle60^\circ\sim85^\circ$  之间，呈层状结构，完整性较好。呈现高阻原因是砂岩电阻率较高、地表水系不发育、岩体完整性好，因此，CSAMT 电阻率断面图呈大范围的高阻区。隧洞埋深一般大于  $500\ m$ ，

表 2 4 种类型 CSAMT 电阻率断面

Table 2 Four types of CSAMT resistance section

电阻率变化类型	编号	长度/km	所占百分比/%	电阻率/ $(\Omega\cdot m)$	岩体结构特征	地下水特征
高阻区	1	21.9	54.75	$(10^3\sim10^4)n$	完整性好	不富水
由地表向地层深处电阻率变小，包 非构造因素	2-1	14.8	37.00	$(10^2\sim10^1)n$	完整性好	富水
括从地表向下一直为大范围低阻区 构造因素	2-2	0.7	1.75	$(10^1\sim10^2)n$	较破碎	富水
由地表向地层深处电阻率增大	3	1.5	3.75	$(10^2\sim10^3)n$	完整性好	不富水
断层及破碎带影响	4	1.1	2.75	$(10^1\sim10^2)n$	破碎	富水







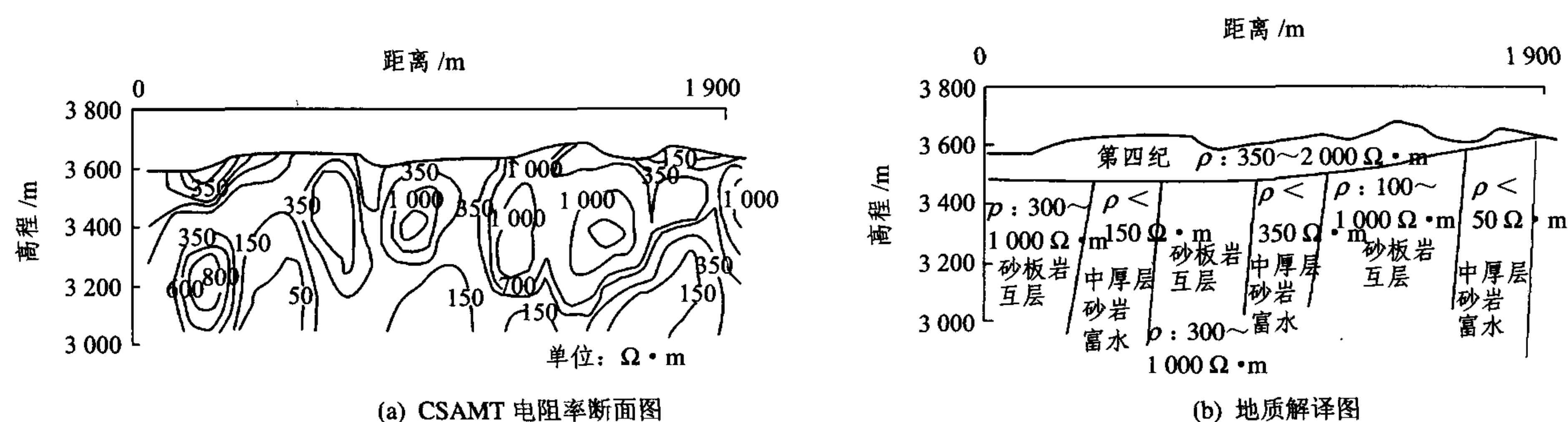


图4 类型2-2的CSAMT电阻率断面图及地质解译图  
Fig.4 CSAMT resistance section and the geological interpretation map of type 2-2

下,  $\rho < 350 \Omega \cdot m$ 。在覆盖层之下为高倾角( $40^\circ \sim 60^\circ$ )中薄层、中厚层的砂岩夹板岩, 由于上部地表水的入渗和汇集, 富水性和导水性较强的砂岩层处于饱水状态, 故在覆盖层以下出现大片相对低阻区。隧洞埋深为 300 m, 地下水和地表水较为丰富, 可能出现涌水、突泥和塌方等现象。

#### 4.3 由地表向地层深处电阻率增大

如图 5 所示, CSAMT 电阻率断面图主要是大范围高阻区, 浅表层出现的低阻是由地表覆盖层导电性优于地层深处引起的, 实际还属高阻区, 其地质解释和工程施工中可能存在的问题类似于图 2。

#### 4.4 断层等构造活动控制的低阻带

如图 6 所示, CSAMT 电阻率断面图等值线在 700~1 000 m 之间突变, 呈条带状, 向下延伸超过 800 m, 至地表向下延伸宽度无明显变化, 电阻率断面图结构变化急促, 结合现场地质推测为断层及其影响带, 宽度为 200 m。该类型低阻对应的地质条件对工程稳定性危害较大, 断层及其影响带内岩体破碎, 为地下水运移和富集的场所, 工程施工时,

易出现涌水、冒顶和坍塌等比较严重的问题。

## 5 结论

测区为高山草场, 高程为 3 700~4 300 m, 岩石露头少, 标志性地层难以确定, 应用 CSAMT 勘探较好地克服常规地质勘察的不足。根据 CSAMT 勘探结果结合现场工作对阿坝段的工程地质条件进行了分类分析, 得出以下定性结论:

(1) CSAMT 电阻率断面图上出现的高阻区, 岩体结构完整, 对应工程地质条件简单, 为工程施工的优良工段, 占测线总长的 58.5%。

(2) CSAMT 电阻率断面图上出现的低阻区, 其低阻由岩性和地下水条件决定的, 与构造成因无联系, 钻孔试验验证了地质推测, 即低阻是中厚层-中薄层砂岩夹板岩地层富水引起的, 反映了深部岩体透水性和富水性优于浅表岩层, 隧洞施工时候, 要穿过相当长的低阻区, 可能出现渗水、局部小破碎带甚至出现涌水、软弱破碎岩体涌出等地质灾

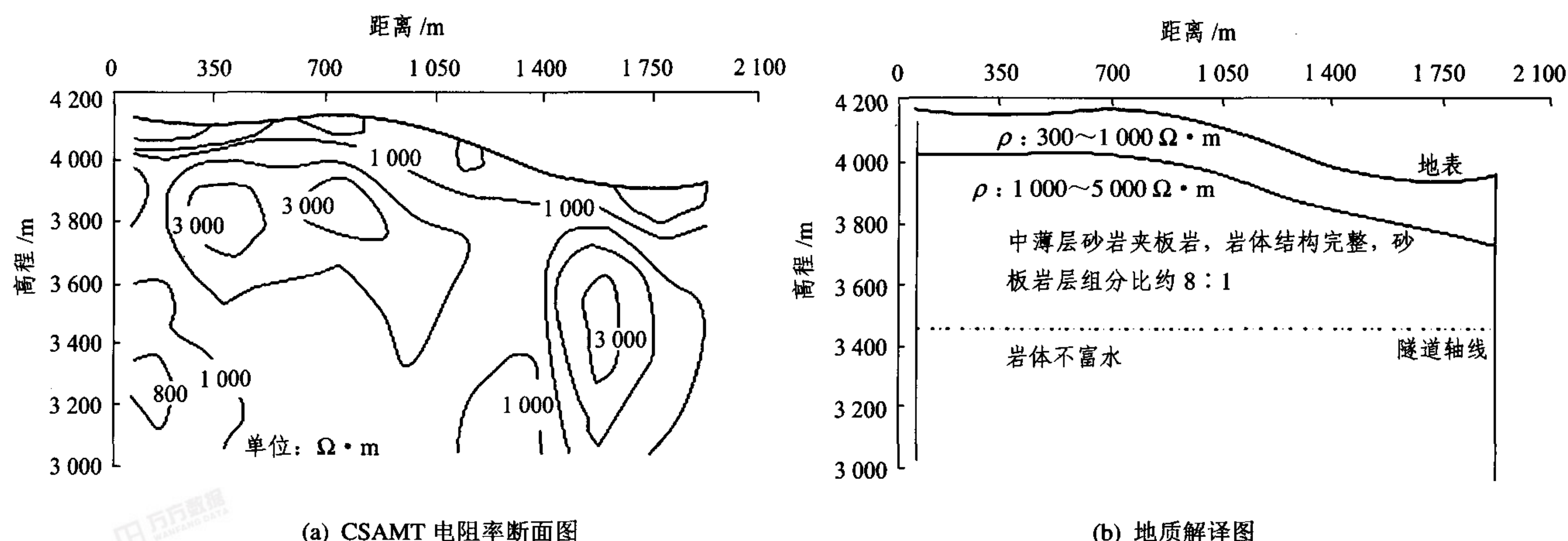


图5 类型3的CSAMT电阻率断面图及地质解译图  
Fig.5 CSAMT resistance section and the geological interpretation map of type 3



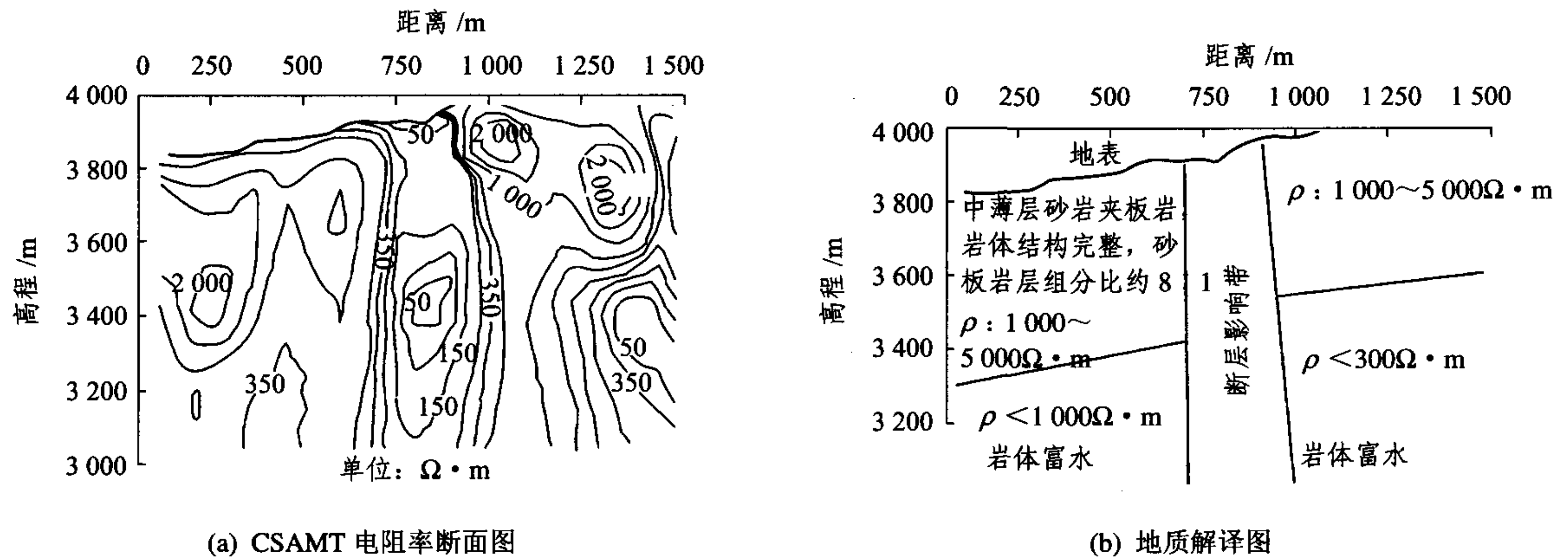


图 6 类型 4 的 CSAMT 电阻率断面图及地质解译图

Fig.6 CSAMT resistance section and the geological interpretation map of type 4

害, 由于地下水补给条件差, 故规模不大, 隧洞施工的时候需注意排水及地质超前预报。虽然物探剖面呈大范围低阻区, 仍对应为工程地质条件简单、工程施工的优良工段, 占测线总长的 37%。

(3) CSAMT 电阻率断面图上的条带状低阻区, 地质推断为断层及其影响带, 对工程施工有一定危害, 占测线长的 4.5%。

### 参考文献(References):

- [1] 伍法权, 王学潮, 国连杰, 等. 南水北调西线一期工程区断层活动性及其对工程的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 370 - 1 374.(Wu Faquan, Wang Xuechao, Guo Lianjie, et al. Fault activity and its effect on the West Line of Water Diversion Project from South to North China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 370 - 1 374.(in Chinese))
- [2] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.(Shi Kunfa. The Theory of CSATM and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese))
- [3] 底青云, 王妙月, 石昆法, 等. 多功能地球物理探测系统——V6

在矿山顶板突水隐患中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2002, 45(5): 1 - 3.(Di Qingyun, Wang Miaoyue, Shi Kunfa, et al. Multifunction system — V6 and its effectiveness in CSAMT exploration[J]. Progress in Geophysics, 2002, 45(5): 1 - 3.(in Chinese))

- [4] 陈仲候. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1993.(Chen Zhonghou. Physical Exploration on Engineering and Environment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.(in Chinese))
- [5] 王学潮, 马国彦. 南水北调西线工程及其主要工程地质问题[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 41 - 43.(Wang Xuechao, Ma Guoyan. Introduction to engineering project of water diversion from the upper Yangtze River into the upper Yellow River and its main engineering geological problems[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1): 41 - 43.(in Chinese))
- [6] 李今朝, 王俊卿, 齐菊梅. 南水北调西线工程深埋长隧洞勘察方法分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2003, 24(3): 53 - 55.(Li Jinchao, Wang Junqin, Qi Jumei. Method of exploration for long deep-buried tunnel in West-route South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2003, 24(3): 3 - 55.(in Chinese))