

归一化总梯度解释法在充电法中的应用研究

杨华¹,李金铭²

(1. 北京师范大学 遥感与 GIS 研究中心,北京 100875; 2. 中国地质大学 工程技术学院,北京 100083)

摘要: 从理论上对归一化总梯度法在充电法中的应用进行了基础研究,并用归一化总梯度法对直接充电的模型实验结果、近矿围岩(间接)充电的理论计算结果和野外实际观测结果进行了解释。结果表明,根据归一化总梯度垂直断面图和不同深度的平面图可较好地确定异常体的中心深度并大致确定其它一些几何参数,为进一步电性参数反演提供较好的初始剖面。

关键词: 充电法;归一化总梯度解释法;解析延拓;奇点

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2001)02-0095-07

充电法是电法勘探方法中最早用来快速勘查、评价有用金属矿产的重要方法之一^[1],其主要理论包括正演和反演两方面。正演理论相对简单,研究较为成熟,而反演相对进展比较缓慢,目前仍多沿用特征点法^[1]。但是由于该方法的一些主观因素,因此具有一定的局限性。近年发展起来的迭代反演方法^[2],主要是对电性参数进行反演,一般不能反演几何参数,并且其反演结果的好坏常依赖于初始剖面的选取。

归一化总梯度解释法^[3]最早由前苏联学者·别列兹金于 60 年代中期提出,主要用于重磁资料的二维解释。近年来,国内曾华霖等将这一方法发展到三维^[4],并将其用于胜利油田等地^[5],取得了较好的效果。该方法利用傅里叶函数和位场的特性,将位场向下延拓,反演地下异常体的几何参数,同时还能对物性参数的反演提供较好的初始剖面。考虑到充电法的位场性质,我们将该法引入充电法,并通过模型实验、理论计算和野外观测资料的解释,说明了归一化总梯度解释法在充电法中的应用效果。

1 归一化总梯度解释法的基本原理

1.1 位场的解析延拓和奇点

众所周知,位场及其微商属于解析函数,可以把它们从测定的区域延拓到较远的但它们仍然是解析的区域。虽然在场源所在的区域内位场不是解析函数,但在形式上可以将它们延拓到这个区域内。对于位场的解释来说这是极重要的,因为在这种情况下可以确定位于场源范围内的位场的奇点,而这些奇点又与异常源的某些特征点(如中心深度点、角点等)相对应。因此确定位场奇点的可能性就是本文所述方法研究的基础。

解析函数论中已证明,任一解析函数(因而也包括电位),除常数外,至少有 1 个奇点。奇点的最简单类型是可去奇点、极点和本征奇点。电场奇点的最普遍形式是极点。

收稿日期:2000-08-22

基金项目:国家“九五”攀登预选项目(95-预-38);国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900)资助

解析函数的定义之一是它可用幂级数表示。从奇点的定义得出,如果已知用以表示解析函数的级数,那么可以用将级数向这些点所在的区域内延拓的方法来求奇点的形式和位置(可去奇点除外),这就是解析延拓对于确定奇点具有重要意义的原因。但实际上,寻找位场的奇点有许多特殊性。这个问题与观测异常是由解析成分(有用信号)和随机干扰组成的有关;此外,异常是以离散形式且在有限的区间给出。这些问题与异常的精度、离散性以及局限性有关,因此,在确定奇点时,需对此施加某些限制。最复杂的问题是在解决实际问题时常常不知道位场的解析式,由此无法求其奇点。考虑用有限项台劳级数来表示函数,但它只在无穷远有奇点,所以很不适宜于求与异常源有关的奇点,用直接解析延拓异常的方法在空间确定奇点的复杂性也就在于此。为克服以上问题,考虑在计算时应用级数的归一化原则,目前归一化原理应用得较成功的是归一化总梯度法。

1.2 归一化总梯度的计算

二维场的归一化总梯度算子 G_h 具有如下形式

$$G_h = \sqrt{(u_x^2 + u_z^2)^v} \left/ \frac{1}{M} \sum_0^M \sqrt{(u_x^2 + u_z^2)^v} \right., \quad (1)$$

式中, u 是某种量或函数,在此指电位 U 。 G_h 描述了沿水平轴 Ox (既可在地表上又可在地表以下的水平面上)和垂直轴 Oz (即平行垂直轴的正方向朝下的其它直线) u 的分布; M 是观测点数; u_x, u_z 是 u 沿轴 Ox 和 Oz 的导数; v 是幂指数,一般计算时取为 1,此时分子在位场中有明确的物理意义:它是指向场源(奇点)的矢量的模数。 v 的增大可提高方法的分辨率,但在观测值带有误差的情况下,稳定性又会降低。

我们知道,在区间 $(-L, L)$ 上给出的异常可以用无穷傅里叶级数表示为正弦与余弦之和,利用该傅里叶级数可以求得给定函数的直线上面或下面的函数 $u(x, z)$,这种运算叫做解析延拓,它只对位函数有物理意义,在非位函数的情况下,这种运算带有形式上的特点。考虑到傅里叶级数的特点,总认为在区间 $(-L, L)$ 以外,函数 $u(x, 0)$ 是重复出现的。编程时可考虑这一点,并且在计算时可以只利用正弦级数部分或余弦级数部分。同时,为了提高延拓过程的稳定性和消除高频振荡,将系数 A_n 或 B_n 乘以形式因子 q_m ,最后得

$$u(x, z) = \sum_1^N B_n \sin \frac{n x}{L} \exp\left(\frac{n z}{L}\right) \left[\sin \frac{n}{N} \left/ \frac{n}{N} \right. \right]^2, \quad (2)$$

其中 N 为级数的总项数。由上式计算出剖面上每个点的 x, z 方向上的偏导数 u_x 和 u_z ,然后代入(1)式,求出归一化总梯度 G_h 。算子 G_h 是复杂的非线性滤波器,它的作用是减少随机干扰和较小异常的效应、分离或加强局部或有用异常以及归一化和换算到无量纲形式。由于它失去了调和函数的基本特性之一——极大值原理,因此 $G_h(x, z)$ 在延拓区域可能有任意多个极值,这些极值与异常源的某些特征点重合,故可以在空间寻找这些奇点,即特征点,达到探测异常源的目的。

1.3 计算过程中的影响因素

由上面所述的计算过程可以看出,影响位场向下半空间延拓的主要因素有以下几点。

1. 由于傅里叶级数为有限或由于这个级数有余项被舍弃而产生的误差。通过近似估计,这种误差基本上取决于积分区间或观测剖面的长度 L , L 愈长,延拓过程愈稳定,一般剖面长度应不小于奇点深度的 5 倍,在实际条件下,这个关系将等于 8~10 倍。

2. 观测的随机误差直接影响到谐波 B_n 的计算精度。若随机误差是均方误差,则误差只取决于观测点数 M , M 愈大,则误差愈小,这就要求观测点数尽可能地多一些, L 长一些。当

给定的 L, M 足够大时,存在着 1 个最佳谐波数 N ,这时 $G_h(x, z)$ 的极值将有最大数值,而它的位置最接近相应奇点的实际位置。据此确定奇点位置的准则称为极大值准则。

另外,由于没有考虑区间 $(-L, L)$ 以外的函数 $u(x, 0)$ 而引起的误差,由于在区间端点取 $u(x, 0)$ 为零值以致造成没有考虑函数的常数部分而引起的误差,与观测的离散性有关的插值误差等因素,对于向下半空间延拓过程的影响不太重要,但在实践中也要注意。当 L, M 的值取得适当时,这些误差的影响不大。

从以上的论述中我们知道,在首次应用本方法的地区,应该进行试算,以便选择方法所需的最佳参数 L, M, N ,尤其是参数 N ,而且该方法适用的地电条件应该是异常源体积较大、埋藏较浅。另外,为了评价所区分出的异常的可靠性,应吸取其它的一些准则,在这方面最有的是地质的准则,即区域地质构造特征。同一地质条件下一系列观测剖面上的 $G_h(x, z)$ 异常可对比性应该较强。

2 归一化总梯度解释法在充电法中的应用

2.1 直接充电石墨板的解释结果

实验是在水槽中进行的(图 1),石墨板长 40 cm,厚 5 cm,下延 10 cm,产状直立,上顶埋深 5 cm。剖面线与走向垂直, $y = 0$ 为主剖面, $y = 10, 20, 30$ cm 为旁剖面。观测参数为一次电位和一次电位梯度。由前面所述归一化总梯度法的基本原理可知,参数 N 的选择很重要,因此在解释之前,我们先计算选择了 $N = 20$ 。

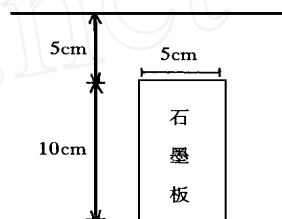


图 1 实验示意

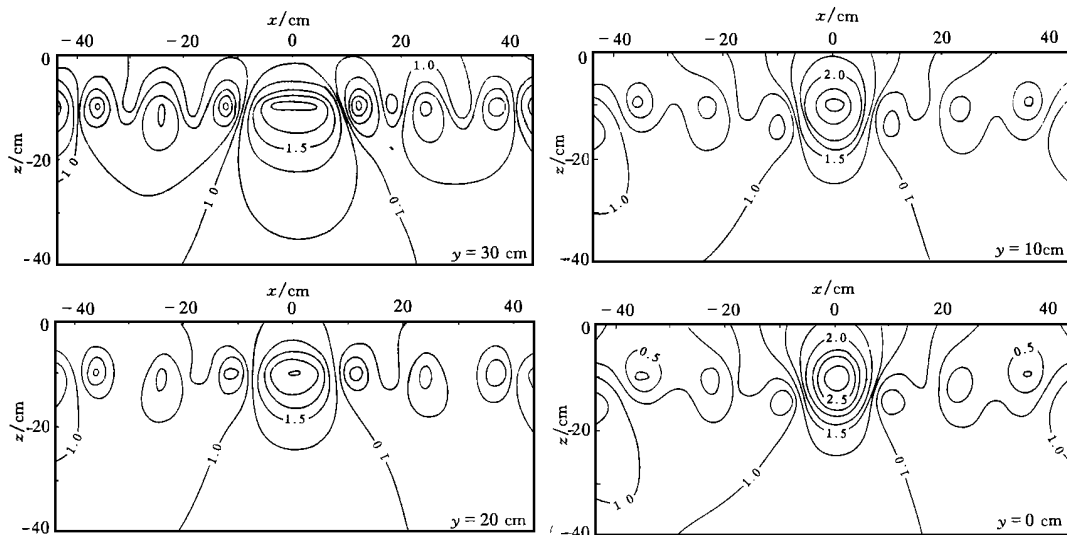


图 2 一次电位的归一化总梯度垂直断面

图 2 为石墨板直接充电时通过主剖面 and 旁侧剖面的一次电位归一化总梯度断面。其中 x 轴表示测线的位置和距离, z 轴垂直向上,表示深度, y 轴沿异常源延伸方向,断面图为 xz 平面,水平断面图为 xy 平面。从图 2 中可以看出,奇点(归一化总梯度极大值点,以下同)和中心点(石墨板的中心)的位置($x = 0, z = -10$)几乎一致,可以很好地确定石墨板的中心深度($h = 10$)。而且随着剖面的远离,极值变小,根据极大值原理,也可以大致判断板在 y 方向的延伸。

图 3 为石墨板直接充电时不同深度的一次电位归一化总梯度水平断面。从图中可以看出板体的走向及位置 ($x = 0$)。在深度合适的情况下 ($z = -10$, 水平断面通过板体中心), 甚至可以根据等值线的极大值和分布规律划分出其厚度和延伸长度, 还可以根据极值的大小和变化大致定出板的中心位置和上、下边界位置。如图中 $z = -10$ 时, 极值达到最大 3.8, 可以认为此时水平断面通过板体中心; 而当 $z > -20$ 后, 奇点的形状发生了变化, 没有了闭合的等值线, 可以认为该深度已大于板体的下延深度, 据此可确定板体的中心深度和下延深度。

综上所述, 由归一化总梯度图可以对异常源从平面和断面方向进行解释, 根据等值线的分布可较好或大致确定异常源的某些几何参数 (如中心点、边界点等)。在解释时, 除了考虑极大值准则之外, 还要注意其它一些准则的综合使用。

另外, 归一化总梯度算子中的 u 也可以是梯度值。我们用上述模型实验中观测的梯度值进行了归一化总梯度计算, 研究结果表明: 由归一化总梯度确定板的中心深度和平面位置效果较好, 而对其它参数的反映能力则较差。

2.2 近矿围岩 (间接) 充电导电极化球体的解释结果

为了解归一化总梯度在间接充电法中的应用效果, 我们用解析求解的方法, 给出了点源电流场中导电极化球体在地表面上一次场和激发极化二次场的解析模拟观测值。其中解析求解所用的参数为: 球的半径为 1 个单位, 中心深度为 2 个单位; 球体电阻率为 $5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 极化率为 40%; 围岩电阻率为 $25 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 极化率为 1%; 测线间距 (以球的半径为单位) 为 1, 测点间距为 0.25; 充电点 (A^*) 位于主剖面 ($y = 0$) 内、球心右侧 $x = 2, z = -2$ 处。

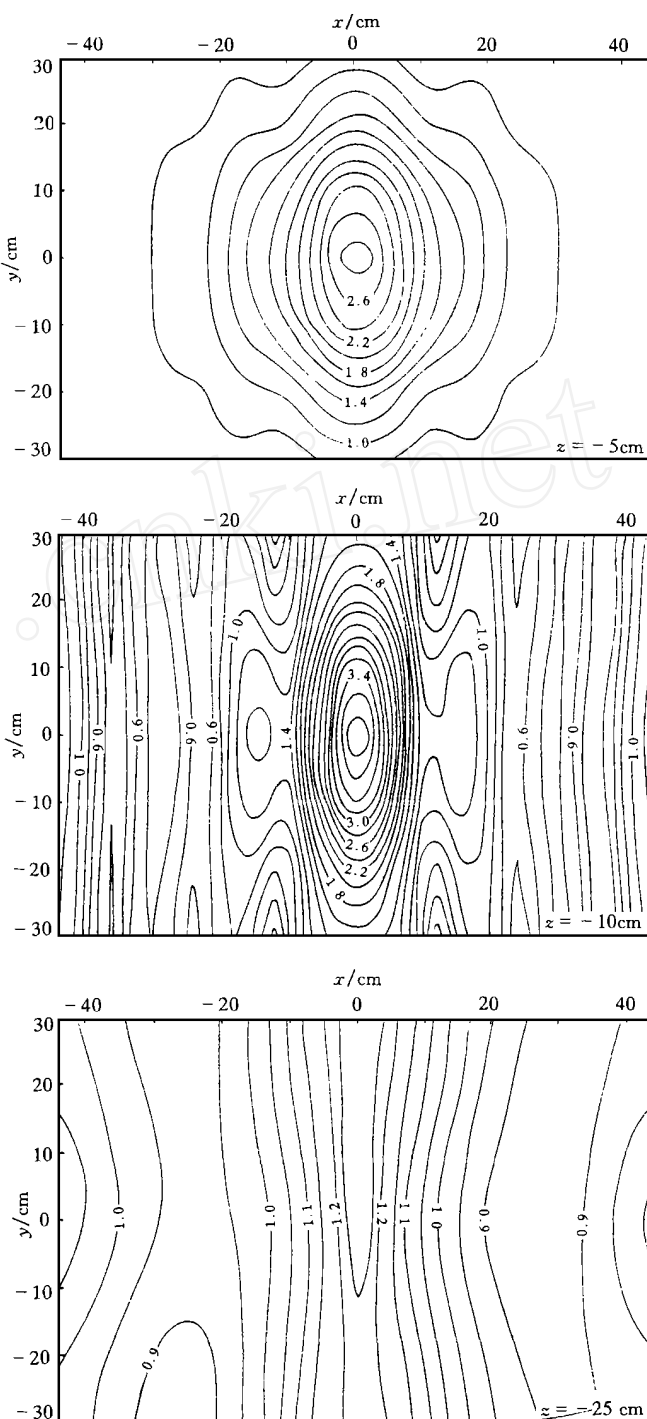


图 3 一次电位的归一化总梯度水平断面

其中解析求解所用的参数为: 球的半径为 1 个单位, 中心深度为 2 个单位; 球体电阻率为 $5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 极化率为 40%; 围岩电阻率为 $25 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 极化率为 1%; 测线间距 (以球的半径为单位) 为 1, 测点间距为 0.25; 充电点 (A^*) 位于主剖面 ($y = 0$) 内、球心右侧 $x = 2, z = -2$ 处。

由于间接充电法中激电二次场反映异常源的能力较强,故首先对激电二次场进行了归一化总梯度解释。结果表明,根据奇点的位置和极值的大小,可以确定异常源(球体)的中心埋藏深度。图 4a 为充电点位于(2,0,-2)时由球体二次电位计算的 $y=0$ 的垂直断面和 $z=-2$ 的水平断面归一化总梯度。图中坐标以球半径为单位。由图可见,此时有 2 个奇点存在,其中 1 个对应充电点,1 个对应球体的中心。

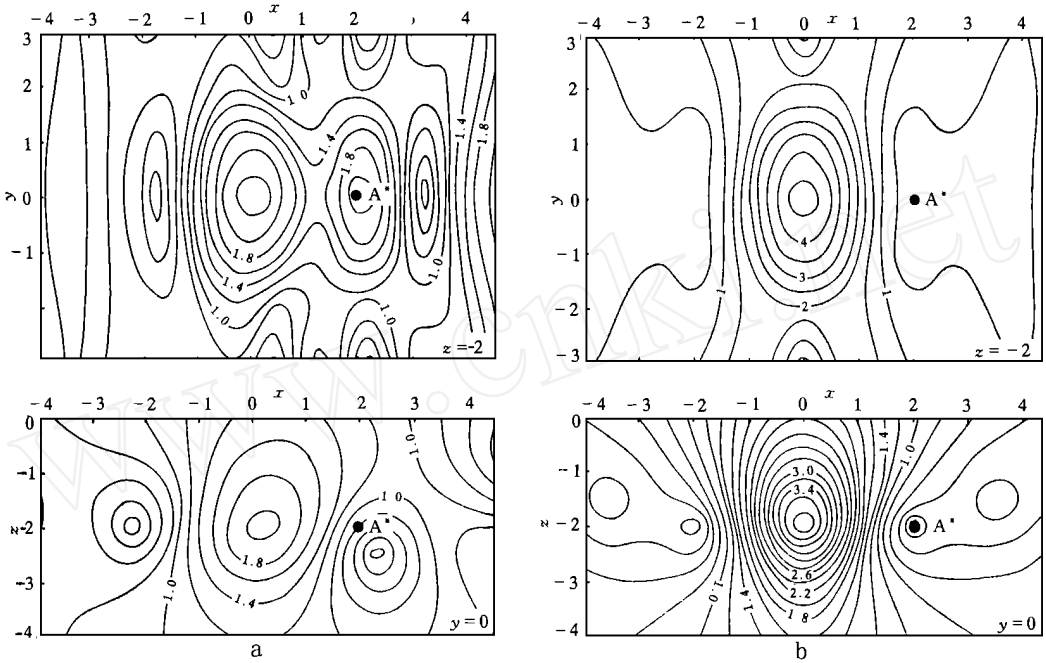


图 4 归一化总梯度

a—由球体二次电位计算; b—由球体一次电位纯异常计算

从以上结果可以看出,二次场归一化总梯度虽然能较好地反映球体的中心深度和位置,但也受充电点的一定影响。研究表明,当利用一次场电位纯异常(由电位观测值中减去点源场的电位值)资料作归一化总梯度解释时,由图 4b 可以看出,此时对应充电点的奇点已经消失,另一奇点则很好地指明了球体的中心深度和位置。根据等值线的分布特征,还可以大致判断球体的范围。

2.3 野外实际资料的解释结果

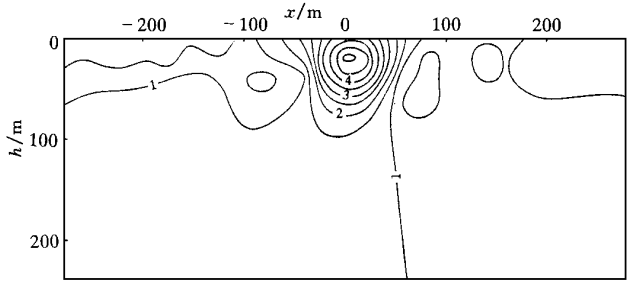


图 5 四川某矿区一次场电位梯度资料的归一化总梯度断面

四川夏塞银铅锌矿区海拔 4 300 ~ 5 050 m,矿床受构造控制,为岩浆期后热液充填交代型

中低温矿床。1998 年为进行方法试验,在此做了充电法,由于条件比较困难,只做了 3 条剖面,现选其中 1 条作解释。图 5 为 1 线一次场电位梯度的归一化总梯度断面。野外充电点布置在离 1 线 100 m 的坑道中、已揭露矿体的底板上。从图中可以看出,归一化总梯度值有 1 个奇点,位于深约 30 m 处,而且其等值线的分布略向左倾斜。已经获得的矿体有关资料表明,此解释结果与实际情况基本符合,说明矿体向下延伸不大。

3 几点认识

通过以上归一化总梯度解释法在充电法中的应用研究,可得出如下几点认识。

1. 该法从复杂的实测电场中分离出有用异常的分辨率较高,一个 $G_h(x, z)$ 的极大值对应 1 个奇点,表现形式简单。
2. 向下半空间延拓时,函数 $G_h(x, z)$ 稳定。
3. 根据 $G_h(x, z)$ 的极值和 $G_h(x, z)$ 在垂直断面、水平断面上的分布特点,可较好确定异常体的中心深度和大致确定异常体的空间位置及分布。
4. 方法的应用效果主要取决于实测资料的精度及测网密度,即数据中应包含足够大的由异常体所引起的信息。同时,计算归一化总梯度所采用的参数也将起重要作用,与谐波数、计算剖面的长度或计算范围等均有关系。
5. 无论是直接充电还是间接充电,归一化总梯度法的解释效果都是比较好的,对提高充电法的解释水平有重要实际意义。但是,为了充分发挥其作用,还需要进一步从理论上对方法特点及应用条件做深入研究,并用较多的实测资料对其解释效果进行检验。
6. 该方法虽然不能确定异常体的电性参数,但可为做电性参数的定量反演提供较好的初始剖面。

曾华霖教授、姚长利副教授在本项研究中给予了支持和帮助,表示感谢。

参考文献:

- [1] 何裕盛,夏万芳. 充电法[M]. 北京:地质出版社,1978.
- [2] 艾伯特塔兰托拉. 反演理论:数据拟合模型参数估算方法[M]. 张先康译. 北京:学术书刊出版社,1989.
- [3] 别列兹金. 物探数据的总梯度解释法[M]. 陆克,刘文锦,焦恩富译. 北京:地质出版社,1994.
- [4] 曾华霖,李小孟,楼海,等. 重力探测油气藏方法及其应用[M]. 北京:地质出版社,1999.
- [5] 曾华霖,李小孟,姚长利,等. 改进的重力归一化总梯度法及其在胜利油区油气藏探测中的应用效果[J]. 石油勘探与开发,1999,26(6):1—6.

THE APPLICATION OF NORMALIZED TOTAL GRADS METHOD TO “MISE-A-LA-MASSÉ” TECHNIQUE

YANG Hua¹, LI Jin-ming²

(1. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In the light of characteristics of analytic continuation and odd points of the potential field function, the authors, using the principle of normalization, deduced the normalized total grads method, and conducted a basic theoretical study on the application of this method to “mise-a-la-masse” technique. In addition, the normalized total

grads method was used to interpret the model experimental result of direct charge, the theoretical computational result of indirect charge of near-ore wallrock, and the field observational result. It is proved that the normalized total grads vertical sections and the plans at different depths can be employed to determine central depths of anomalous bodies quite satisfactorily and to define roughly some other geometric parameters. Hence, the fairly good initial profile can be provided for further inversion of electrical parameters.

Key words: “mise-a-la-masse” technique; normalized grads method; analytical continuation; odd point

作者简介: 杨华(1971 -),女,湖北人。1999年毕业于中国地质大学(北京)工程探测及信息技术学院,获博士学位。现在北京师范大学资源与环境科学系、遥感与GIS研究中心作博士后,主要从事定量遥感的基础研究和GIS研究。

(上接 94 页)

- [13] Kaltschmitt M, Wiese A. Potentials and costs of renewable sources of energy in the Federal Republic of Germany[J]. Energy sources, 1994, 16(2): 185—193.
- [14] 陈墨香,汪集,邓孝. 中国地热资源形成特点和潜力估计[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [15] 王均,周家平. 华北平原中低温地热资源及其利用的环境影响[M]. 北京:地震出版社,1994.
- [16] 汪集,熊亮萍,庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [17] 黄尚瑶. 中国温泉资源(1 600 万中国温泉分布图说明书)[M]. 北京:中国地图出版社,1993.

THE PRESENT STATE OF DIRECT UTILIZATION OF GEOTHERMAL RESOURCES IN THE WORLD

ZHANG Ji-sheng, WU Gong-jian

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Abstract: This paper mainly recounts the state of the research and exploitation of geothermal energy in the world since 1990, especially the information related to the International Geotherm Conference held in Italy in 1995 and the International HDR Conference held in Japan in 1997, and gives a summarized description of the advances in the research and exploitation of geothermal resources in the past ten years. It is the authors' hope that the understanding of the present state of the geothermal research and exploitation in the world can stimulate the further rational exploitation and utilization of geothermal resources in China.

Key words: geothermal resource; heat pump; HDR

作者简介: 张季生(1950 -),男,江苏省盱眙县人。1989年毕业于西安地质学院,获应用地球物理学硕士学位,研究方向为区域重磁勘探。现为中国地质科学院地质研究所岩石圈研究中心研究员,已发表论文数10余篇。