

技术·方法

# 海底电场传感器原理及研制技术

邓明<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>2</sup>, 白宜诚<sup>3</sup>, 颜送清<sup>1</sup>, 邓靖武<sup>1</sup>, 储伟光<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国船舶重工集团公司 725 研究所, 青岛 266071; 3. 中南大学, 长沙 410083)

**[摘要]**因海底电场信号微弱、海下自然环境复杂以及海水导电介质以氯离子为主等原因,用于海底电场信号测量的电场传感器在材料和结构上有其特殊性。研制海底电场传感器成为开展海洋大地电磁探测的重要技术内容之一。研制过程遇到的主要技术问题有:海底电极材料的选择;电极的制作工艺;承压与密封技术;海水运动对测量产生不利影响的克服办法;水下弱信号传输的抗干扰问题,等等。阐述了对上述问题的解决办法,提出了海底电场传感器的全套研制方案,并列出了相关的室内模拟实验和海洋试验的结果。

**[关键词]**海洋探测 大地电磁 电场传感器 海洋试验

**[中图分类号]**P631.3 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2002)06-0043-05

## 0 引言

大地电磁场是一种天然场,通过对其检测,可获得地下深部的电学信息。大地电磁测深法在陆上的应用已较为成熟,在大地构造研究和地层划分等方面,该方法的成效是较为显著的。然而长期以来,国际上对海洋大地电磁的研究进展缓慢,在我国甚至是空白。其部分原因在于,海洋电磁探测技术未获突破。近些年来,随着海洋地球物理研究的深入,人们发现,在一些使用常规海洋物探方法(如人工地震法)效果不佳的地区,如火山岩覆盖区,碳酸盐岩、珊瑚礁等分布区,以电性参数反映海底以下介质分布规律的海洋大地电磁法却能提供出有价值的信息,因此引起了人们的兴趣。

在大地电磁测深法从陆地往海洋移植的过程中,要解决的技术问题之一是水下电场信号的检测,与陆上同方法的检测手段相比,在海底实现测量具有一定难度。因为,大地电场信号是接触传播的,要想测得海底的电场信号,既要求电极部分与海水接触,又要求信号引线部分与海水隔离。其次,从信号能量角度看,由于存在海水层的衰减作用,到达海底的电场信号比陆上的同类信号要微弱得多,幅度可小至微伏级,这就要求海底电场传感器有更高的测量灵敏度。再者,从信号观测时间间隔看,由于海底

电场信号的频率成份以中、低频为主,故信号采集时间相对较长。一般情况下,仪器需放置在海底一星期以上,甚至更长,这对海底电场传感器的测量稳定性提出很高的要求。

## 1 海底测量电极

研制海底电场传感器首先关注的问题是,选用何种电极材料?从实验可证实,陆上测量中使用的电极材料如 Cu|CuSO<sub>4</sub>、Pb|PbCl<sub>2</sub> 等都不适宜用于海洋测量环境。其理由是,虽然 Cu、Pb 这两类金属的极差稳定性对陆上测量来说是满足要求的,缘于陆上被测信号的幅值较大,由极差不稳造成的影响不致于使有用信号产生严重畸变,但是海底情况却不同。海底电场信号微弱,Cu、Pb 类电极其极差变化的幅值至少是与有用信号同数量级,甚至比有用信号幅值还大,为使信号观测的信噪比能达到海底测量的要求,必须寻求极差小且更为稳定的金属材料。经过多次调研,目前海底测量电极所选择的材料是 Ag|AgCl。

### 1.1 Ag|AgCl 的电化学特性

选择银、氯化银作为海底电极材料,是有理论和实验依据的。

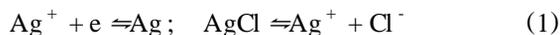
先从电极净反应速度讨论 Ag|AgCl 的极化稳定性问题。Ag|AgCl 电极在海水中存在着两个相界

[收稿日期]2001-12-28; [修订日期]2002-03-04; [责任编辑]余大良。

[基金项目]国家 863 计划研究课题(编号:820-03-04)资助。

[第一作者简介]邓明(1956年-),男,1982年毕业于中国地质大学(武汉),获学士学位,副教授,长期从事地球物理探测仪器的教学与科研工作。

面,即  $\text{Ag}|\text{AgCl}|\text{Cl}^-$ 。电极的可逆反应包括如下两个平衡关系:



当有微量电流(如信号电流)通过电极界面时,上述平衡出现偏离。如果电极反应速度跟不上电子运动速度而造成电荷在界面上的积累,则电极极化现象愈演愈烈,以致于有用信号被最终淹没。倘若电极反应速度足够大,致使去极化与极化作用趋于平衡,则极化过电位很小,这对于信号检测来说,无疑是有益的。 $\text{Ag}|\text{AgCl}$  电极反应速度符合 Butler - Volmer 方程所表述的规律<sup>[1]</sup>,其表示式为:

$$j = j^0 \left\{ \exp \left[ - \frac{F}{RT} U \right] - \exp \left[ - \frac{(1-\alpha)F}{RT} U \right] \right\} \quad (2)$$

上式中, $j^0$  为金属银的交换电流密度;称作传递参数,对于  $\text{Ag}|\text{AgCl}$ , 约等于  $0.5$ <sup>[2]</sup>;  $F$  为法拉第常数;  $R$  为气体常数;  $T$  为温度;  $U$  表示有电流通过时电极的极化值;  $j$  为电极的净反应速度。

分析(2)式可看出,温度一定时(温度影响问题稍后再讨论),在同一个净反应速度下, $j^0$  越大则  $U$  越小,  $U$  小意味着偏离平衡态的趋势弱,电极易于稳定。或者说,当电极出现极化,即微量电流流过电极时,交换电流密度越大者,净反应速度越快,建立新的平衡的能力越强,即去极化作用越强。有关研究表明<sup>[3]</sup>,  $\text{Ag}$  的  $j^0$  值比  $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$  类高出 4 个数量级以上,因而其电极的稳定性较好。

再从  $\text{Ag}|\text{AgCl}$  电极电位来讨论其稳定性问题。按照电化学理论,金属银与电解质接触时,在其界面上必定存在电极电位,此电位可由 Nernst 方程的变式来描述<sup>[4]</sup>,即有如下表示式:

$$\phi = \phi_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}^0 + \frac{RT}{F} \ln K_{\text{SP}} - \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Cl}^-} \quad (3)$$

式中各量的含义: $\phi_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}^0$  表示在标准状态下银电极与氢电极作参比的电极电位,可查表求得;  $R$ 、 $T$ 、 $F$  与(2)式中表示的意义相同;  $K_{\text{SP}}$  为  $\text{AgCl}$  的溶度积常数;  $a_{\text{Cl}^-}$  为海水中氯离子的活度;  $\phi$  表示固液相界面上氧化还原反应平衡时的电极电位。

由(3)式可知,在海水中,  $\text{Ag}|\text{AgCl}$  电极电位与温度  $T$  及氯离子活度  $a_{\text{Cl}^-}$  有关。恰恰在海底,数月时间内的水温和某一海域范围内水的含盐浓度(等价于  $a_{\text{Cl}^-}$ ) 近乎不改变,因而  $\text{Ag}|\text{AgCl}$  电极在海底的电极电位可认为是恒定的。

另外,  $\text{AgCl}$  是一种难溶盐,可在海水中长期放置。而它对光反应敏感的问题,在水深数十米以下,光线不达之处,弊端则自行消除。综上分析表明,  $\text{Ag}|\text{AgCl}$  是较为理想的海底电极材料。

## 1.2 海底测量电极的工艺制作过程

研制海底测量电极,除了选材,制作工艺颇为严格。因为海底环境是一种特殊的自然环境,与陆上环境显著的不同点在于,海下存在较大的压力。且水深每增加 10 m,压力约增加 101 KPa<sup>[5]</sup>。所以在制作海底测量电极时,要充分考虑到如何使制成后的电极能在承压环境下工作。

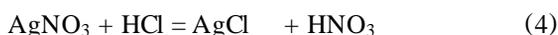
$\text{Ag}|\text{AgCl}$  海底测量电极的工艺制作过程如下。

第一步:选择化学材料。所需的主要材料见表 1。

表 1  $\text{Ag}|\text{AgCl}$  电极材料配置表

材料名称	型号及规格
银粉	纯度 99.95%, 粒度 250 ~ 300 目
硝酸银	分析纯
盐酸	分析纯
银棒	2 号银

第二步:制取  $\text{AgCl}$ 。在避光的环境下,将等浓度的  $\text{AgNO}_3$  和  $\text{HCl}$  溶液按 1:1 配量均匀反应,反应式为:



反应后生成白色氯化银沉淀物。接下来用蒸馏水以倾注法反复洗涤,每次洗涤后进行测试。当倒出的溶液 pH 值达到 6 ~ 7 时,洗涤完成。经过过滤,将滤出的氯化银在 40 ~ 50 烘箱内烘干。再对干燥的氯化银粉进行研磨,以过筛方法取其 120 目以上的粉剂,并将其保存在遮光容器内。

第三步:粉压成型。按照一定的剂量比例,将  $\text{Ag}$  和  $\text{AgCl}$  均匀搅拌成粉末冶金配剂。在圆柱体模具内,以 98 MPa 的压力,将粉末冶金材料一次冷压成电极坯体,并在 320 的高温下进行数小时的烧结。制成的电极坯体经盐酸活化处理,与银棒进行螺纹连接后即成为可在海底使用的测量电极。

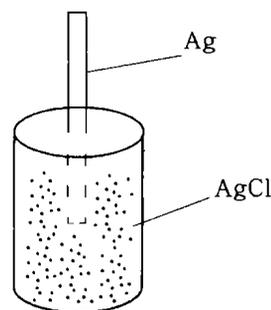


图 1  $\text{Ag}|\text{AgCl}$  海底测量电极

图 1 是该电极的简示图。其中,圆柱形部份的高为 35 mm,直径为 15 mm,银棒直径为 4 mm,制成的电极在室内放进 10 MPa 的高压舱中进行环境

模拟试验,未见损坏。说明用上述方法制成的电极可用于海下测量。

## 2 海底电场传感器的结构

### 2.1 结构设计所面临的技术问题

欲将 Ag|AgCl 电极用于海底测量,以下几个问题还有待于解决:

- 1) 信号引线端的密封;
- 2) 海水流动对信号测量的影响;
- 3) 弱信号的传输。

对于问题一,理由是显而易见的。若 Ag|AgCl 电极在银棒处出现浸水,则海水将沿引线进入后续的电子线路,导致电路故障。为此,需将电极的银棒部分与水隔绝,只允许 AgCl 部分与水接触。对于问题二,与海底的测量环境有密切关系。海水是流动的,海底洋流与测量电极之间存在着相对运动。虽然在宏观上,海水的氯离子浓度不变,可以认为 Ag|AgCl 电极周围的  $Cl^-$  离子是一个固定值。然而在微观上,当海水与电极之间有相对运动时,电极周围的  $Cl^-$  离子在频繁地交换。特别是当流速增加时,电极界面的双电层很难维持平衡。解决这一问题的办法是尽量减小电极与海水的相对运动。对于问题三,涉及到弱信号检测方面的内容。海底电场属于微弱信号,每米距离的信号幅度可小至微伏级<sup>[6]</sup>。为提高被测信号的观测幅度,需设法增加电极距。然而由于海上作业条件及远洋科学考察甲板有限面积等因素的限制,海底的电极距在量级上远比不上陆上测量的情况。尽管发明了一些特殊技术<sup>[7-8]</sup>,但目前海底电极距的跨度也只能达到十多米,这给本来海底信号已被衰减的不利情况又增加了测量难度。既然在信号提取手段上已受到限制,就必须设法提高信号在传输过程中的抗干扰性。为此,需在检测端先行对信号予以放大,即在海底电场传感器内部安装一个前置放大器。

### 2.2 结构设计方案

按照上述的设计思路,并考虑装配合理、密封承压、抗海水腐蚀等因素,所设计的海底电场传感器如图 2 所示。

由图可见,在序号 10 的位置上,有一圈特殊密封胶,在该位置的左边,电极周围充满海水,而右边,由于有密封胶的隔离,保证了信号引线部分不出现浸水。电极座与腔体内,通过序号 11 所示的 O 型圈实现密封。腔体的外壳由 ABS 材料制成。该材料韧性大、绝缘性好且不与海水产生化学腐蚀反应。

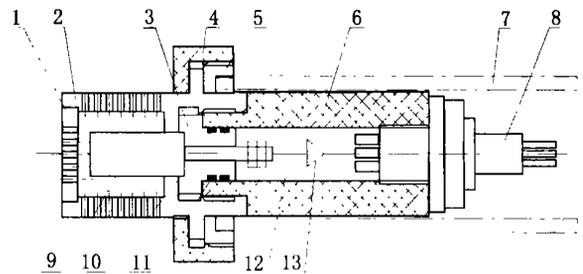


图 2 海底电场传感器装配图

- 1—电极保护盖;2—电极保护罩;3—电极座;4—锁母;5—螺套;
  - 6—外壳;7—ABS管;8—多芯水密连接插件;9—Ag|AgCl电极;
  - 10—密封胶;11—O型圈;12—腔体;13—前置放大器
- (图与实物比例尺:1:2)

电极保护盖和电极保护罩也由 ABS 材料制成,它们组成一个外表象蜂窝状的圆柱形多孔罩,其作用除了保护电极在海上作业时不易碰损外,主要是减缓海水与电极的相对运动。因为罩内充满海水,所以不影响电场信号的传入,罩内外间不存在电阻。而对海水的流速而言,显然由于有罩体的阻隔,罩内流速比罩外流速要慢得多。螺套和锁母是起安装固定作用的,在海底测量时,每个电场传感器由一根测量臂将其伸展到离仪器主体 5m 远的位置。测量臂是管状的,在臂的顶端,螺套与 ABS 管固紧,锁母再与螺套拧接,把电场传感器牢牢地固定(图 2)。前置放大器安装在腔体内,电源馈线通过多芯水密电缆送给放大器,被放大的电场信号沿电缆中的信号线被送到仪器舱内的数据采集电路中。

## 3 实验测试

测量海底电场信号的硬件工作原理示于图 3。实验先后在实内和海洋环境中进行。

### 3.1 室内模拟测试

模拟海洋环境的测试在室内大水槽中进行。水槽的长、宽、深为  $5 \times 3 \times 2.5 \text{ m}^3$ 。室内测试内容包括电场传感器灵敏度和稳定性测试。在灵敏度测试中,往水下供已知的弱信号,信号经大约二十倍的衰减,在大水槽的底部进行观测,所得结果见图 4。

从测试结果看,所研制的电场传感器具有较好的弱信号分辨力。

稳定性试验则是在没有外加电场的情况下测试水中两个电极间的自然电位。连续观测时间两天两夜,由观测结果所描绘的曲线见图 5。

由图可见,在室温有昼夜变化的两天内,电极电位仅变化了 0.1 mV,可以说,该电极的极差变化是较小的。

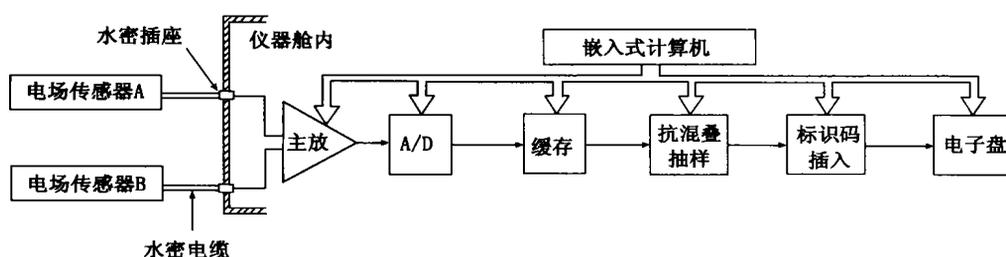


图3 海底电场信号测试原理图

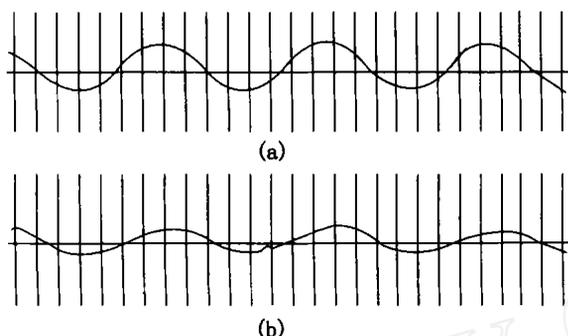


图4 海底电场传感器灵敏度测试结果

(a) 供电信号:5 mV,0.1Hz

(b) 供电信号:0.5 mV,0.1Hz

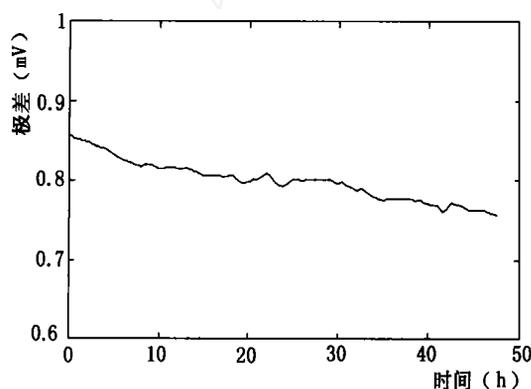


图5 海底电场传感器极差稳定性测试曲线

### 3.2 海洋试验

试验海区位于我国台湾海峡以东约 150km 的海面上,地理坐标为 N25°42.33'、E122°33.79',海区水深 136m。由于遇到了台风、海下地震等恶劣海况,海上作业条件较为艰巨。在海试中,仪器被放置在海底六天,进行了包括海底电场在内的多路大地电磁信号和多种海底环境状态信号的测试,其中两路海底电场( $E_x$ 、 $E_y$ )信号的部分实测时间序列示于图 6(a),对所测的电场信号进行傅立叶变换,可得图 6(b)的幅频特性曲线。

从幅频特性曲线看,随着信号频率的由低到高,信号幅度呈现从毫伏级到微伏级逐渐衰减的趋势。

10Hz 以上,信号幅度就相当微弱了。整个曲线形态与有关的理论估计相吻合<sup>[9]</sup>,与英美学者不久前在美国西部海域进行的有关地电与地磁的测试结果有相似的规律<sup>[10]</sup>。这说明在东海的测试数据是真实的地球物理场信息。

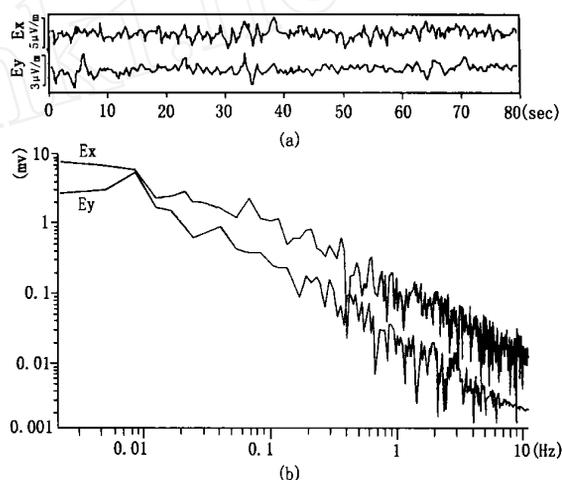


图6 海底实测电场信号及幅频特性曲线

## 4 结语

室内试验和海洋试验都证实,所研制的海底电场传感器是灵敏的和实用的,这为开展我国的海洋电磁探测提供了一种可借鉴的技术产品。我国的海洋电磁探测才刚刚起步,要实现其产业化,还需许多的改进与优化工作。我国三百多万平方千米的蓝色领海,将给电磁方法提供光明的应用前景。

致谢:本课题得到了国土资源部广州海洋地质调查局及“海洋四号”远洋科学考察船全体人员的大力协助,特致谢意。

### [参考文献]

- [1] 吴浩青,李永舫. 电化学动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1998,39.
- [2] 郭鹤桐,覃奇贤. 电化学教程[M]. 天津:天津大学出版社, 2000,193.
- [3] 杨文治. 电化学基础[M]. 北京:北京大学出版社,1985,154.
- [4] 张绍衡,朱艳云,高文素. 电化学分析法[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1998,154.

- 出版社,1994,14~15.
- [5] 冯士筌,李凤岐,李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京:高等教育出版社,1999,61.
- [6] A D Chave, S C Constable, R N Edwards. Electrical exploration methods for seafloor. In: M N Nabighian. Electromagnetic methods in applied geophysics[M]. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991,931~934.
- [7] 魏文博,邓 明,谭捍东. 水下自动伸张测量臂[P]. 中国专利:ZL00250111.2,2001.
- [8] 邓 明,魏文博,谭捍东. 两分量海底大地电场仪总成[P]. 中国专利:ZL00254755.4,2001.
- [9] 魏文博,邓 明,谭捍东,等. 利用海底大地电磁探测研究南海地壳电性结构的必要性[M]. 苏纪兰. 南海环境与资源基础研究前瞻. 北京:海洋出版社,2001,123~132.
- [10] Ikuko Fujii, A D Chave. Motional induction effect on the planetary scale geoelectric potential in eastern North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research,1999,104,(1):1343~1359.

## THE THEORY AND DEVELOPMENT TECHNOLOGY OF THE SEA - FLOOR ELECTRIC FIELD SENSOR

DENG Ming<sup>1</sup>, LIU Zhi-gang<sup>2</sup>, BAI Yi-cheng<sup>3</sup>, YAN Song-qing<sup>1</sup>, DENG Jing-wu<sup>1</sup>, ZHU Wei-guang<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. No. 725 Institute of Chinese Shipbuilding Industry Group Corporation, Qingdao 266071; 3. Central South University, Changsha 410083)

**Abstract**: Because of the faint electric field signal on sea-floor, the complex nature environment under the sea and chlorine ion as electric conduction in seawater, the material and the structure of the sea-floor electric field sensor is completely different from that of the electrode which is used on land. The development of the sea-floor electric field sensor becomes one of the important technologies for the marine MT prospecting. The main technical difficulties during the development are: the selection of the sea-floor electric field sensor's material; the process of sensor making; the technology of the sealing and compressive stress bearing; the elimination of influence by the flowing water; the anti-jamming during the faint signal transmission; etc. In this paper, the solutions for above problems are described. The scheme of the sea-floor electric field sensor development, and some simulation study and sea experimentation results are given.

**Key words**: marine prospecting, magnetotelluric, electric field sensor, sea experimentation

## 我刊编委王驹荣获首届黄汲清青年地质科学技术奖

第一届黄汲清青年地质科学技术奖 10 月 15 日揭晓,10 位在地质学领域取得创造性科学成就,或在地质勘察及地质教育等工作中做出突出贡献的青年地质工作者获此殊荣。

10 位获奖者分别是:第四纪地质与古气候地质学家、中国科学院地质与地球物理研究所所长丁仲礼;石油地质学家、中国石油新疆油田分公司总经理王宜林;核废物地质处置学家、核工业北京地质研究院院长助理王驹;地质地球物理学家、中国石化胜利油田有限公司物探研究院副院长刘传虎;石油地质勘探学家、中国石油大港油田公司副总经理吴永平;大地构造与古地磁学家、中国地质科学院地质力学研究所室主任杨振宇;海洋地质与石油地质学家、广州海洋地质调查局区调所副所长邱燕;地球物理学家、中石化新星西南分公司第二物探大队总工程师唐建明;海洋地质学家、南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室主任高抒;地质工程、环境地质学家、地质灾害防治国家专业实验室主任黄润秋。

王驹是我刊编辑委员会委员,核废物地质处置学家,

研究员级高级工程师、博士生导师,我国高放废物地质处置研究方面的学科带头人,目前是国际原子能机构技术合作项目“中国高放废物处置场址预选和场址评价研究”项目主任,国际科技重点预研项目“高放废物地质处置研究”项目负责人和国防科工委三废专业课题的第一总负责人,为我国高放废物地质处置研究做出了突出贡献,提出了我国高放废物地质处置库和地下实验室开发的“三步曲式”技术路线,即“选址—特定场址地下实验室—处置库”,缩短了与先进国家研究水平的差距。走出了一条适合我国国情的技术路线,得到国际原子能机构专家的高度评价。

此外,王驹在铀矿床和铀元素地球化学研究以及金元素地球化学研究方面也取得了显著成绩。提出了“气体还原作用可致铀沉淀成矿”和“金元素预富集系列和三阶段成矿”等理论,为业内专家所赞许。曾获得中国地质学会青年地质科技银锤奖、中央国家机关优秀青年奖、中国核工业地质科研究突出贡献奖等奖项和荣誉。