

油气化探技术本土化过程与意义

刘崇禧¹ 赵克斌¹ 程军²

(1. 中国石油化工集团 石油勘探开发研究院 石油化探研究所 ,安徽 合肥 230022 2. 合肥工业大学研究生院 安徽 合肥 230009)

摘 要 :中国油气化探在 40 余 a 的发展中 ,历经坎坷 ,坚持走国外引进、试验改造、开拓创新的道路 ,建立与形成了具有中国特色的找油气技术方法。在化探方法指标筛选、应用条件研究、分析测试技术改进、数据处理及解释评价等方面 ,都实现了本土化的过程。继续吸纳新技术、新方法 ,借鉴国外经验 ,在实践中不断创新 ,是油气化探持续发展的必由之路。

关键词 油气化探 ;方法指标 ;应用条件 ;测试技术 ;本土化

中图分类号 :P632 ,TE132 文献标识码 :A 文章编号 :1000 - 8918(2002)02 - 0106 - 04

中国油气化探是 50 年代从前苏联引进的 ,由于脱离实际照搬国外技术方法 ,致使效果不佳 ,纷纷下马。石油 101 队技术人员在审视走过的里程时 ,认识到对引进的化探技术方法不能采取“拿来主义” ,必须结合国情 ,经过试验 ,进行消化 ,建立适于中国特定条件的化探技术方法。经过长达近 40 a 的本土化过程 ,1987 年化探纳入油气勘查技术序列 ,形成了具有中国特色的找油气技术 ,走向了为油气勘查服务的科学轨道。

1 油气化探方法的本土化

最早从国外引进的化探方法是沥青法和水化学法 ,其后有气测法、土壤盐法、微生物法、放射性法及氧化还原电位法等 ,基本上按前苏联的分析测试流程进行工作。经过在松辽盆地、济阳拗陷及鄂尔多斯盆地西部已知油气田的试验、长期观测和实际应用 ,发现上述方法有的稳定性较差 ,有的指标需要拓宽 ,有的分析技术有待改进。沥青法用荧光灯照射或比色法 ,强度低且重复性较差 ,由于仪器设备灵敏度低而不能适应化探生产需要 ;微生物法在当时的野外试验条件和工作环境下达不到无菌操作的要

求 ,土壤盐法测试仪器精密度较差 ,氧化还原电位法如何保持样品原始环境还有一定难度。因此上述方法有的被淘汰 ,有的暂缓研究。此后将研究精力主要集中于水化学法和酸解烃法。

水化学法具有累积油气信息的功能 ,在中国东部水井的自然分布量较多 ,可以达到化探普查阶段样点密度的要求。试验和长期观测资料证明 ,异常稳定性较高(表 1、表 2)。但传统的方法侧重于水中无机组分(常量与微量)的研究 ,提供的油气信息在深度与广度上远远不够。中国石油化探工作者 ,通过对不同含油气时代的地下水、石油及天然气化学成分、含油岩浸泡、油气水混合、岩盐化学成分平衡等方面的试验 ,逐步开拓了水溶气态烃、酚系物、苯系物、荧光光谱、紫外吸收光谱及同位素(C、H、O)等指标 ,建立了水样现场萃取处理技术、样品制备方法与分析测试流程 ,形成了水化学测量较为系统的方法系列。比较全面地提取了蕴藏在油田水或地下水中的油气信息(表 3~5)。有较高的应用价值。

根据前苏联倡导的气测法原理 ,开发了土壤酸解烃法 ,通过对脱气温度、抽提时间与压力、不同试剂、样品用量与粒度等十余种方法试验 ,建立现行的

表 1 临盘油田同一样点不同年份水化学成分 mg/L

| 年份 | Na ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | 矿化度 | 阴离子顺序 |
|------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|---|
| 1964 | 365.42 | 114.67 | 282.36 | 699.21 | 413.08 | 798.91 | 1974.20 | HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —SO ₄ ²⁻ |
| 1967 | 416.94 | 110.17 | 302.60 | 741.76 | 422.21 | 767.61 | 2377.49 | HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —SO ₄ ²⁻ |
| 1970 | 453.96 | 59.10 | 307.21 | 962.83 | 408.76 | 725.50 | 1321.86 | HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —SO ₄ ²⁻ |
| 1971 | 301.03 | 97.04 | 278.76 | 524.41 | 355.92 | 779.81 | 1557.18 | HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —SO ₄ ²⁻ |
| 1972 | 281.02 | 139.60 | 261.92 | 727.93 | 203.66 | 732.22 | 1620.24 | HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —SO ₄ ²⁻ |
| 均值 | 336.67 | 104.16 | 286.57 | 677.23 | 360.73 | 760.82 | 1410.19 | HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —SO ₄ ²⁻ |

表 2 同一样点不同季节水化学成分

| 季节 | 矿化度 g·L ⁻¹ | 阴离子顺序 (据含量高低) | 阳离子顺序 (据含量高低) | $r(\text{Ca}^{2+})$ $r(\text{Mg}^{2+})$ |
|----|--------------------------|---|--|--|
| 雨季 | 1.84 | Cl ⁻ —HCO ₃ ⁻ —SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ —Na ⁺ —Mg ⁺ | 1.48 |
| 旱季 | 1.83 | Cl ⁻ —HCO ₃ ⁻ —SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ —Na ⁺ —Mg ⁺ | 1.68 |
| 冬季 | 1.58 | Cl ⁻ —HCO ₃ ⁻ —SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ —Na ⁺ —Mg ⁺ | 1.59 |

表 3 不同类型地下水中酚系物组成 10⁻⁹

| 水的性质 | 酚 | 间 + 邻甲酚 | 对甲酚 | 二甲酚 |
|-------|------|---------|------|-------|
| 非油田水 | 37.0 | 0.0 | 1.0 | 1.5 |
| 油田水 1 | 0.0 | 27.0 | 3.0 | 1.5 |
| 油田水 2 | 0.0 | 16.5 | 0.6 | 4.5 |
| 油田水 3 | 0.0 | 107.5 | 21.5 | 27.5 |
| 油田水 4 | 0.0 | 90.0 | 0.5 | 95.0 |
| 油田水 5 | 0.0 | 27.5 | 20.5 | 187.5 |

表 4 油田水中可溶气态烃组成 $\mu\text{L/L}$

| 盆地 | 甲烷 | 乙烷 | 丙烷 | 丁烷 | 重烃 | 总烃 |
|------|----------|---------|--------|-------|---------|----------|
| 济阳 | 18915.35 | 3021.00 | 24.45 | 4.21 | 3049.66 | 21965.01 |
| 江汉 | 1515.39 | 380.21 | 332.57 | 69.96 | 782.74 | 2298.13 |
| 苏北 | 28399.68 | 226.92 | 131.70 | 92.14 | 450.76 | 28850.44 |
| 松辽 | 2888.60 | 4.61 | 2.40 | 4.68 | 11.69 | 3900.29 |
| 准噶尔 | 221.19 | 13.23 | 12.92 | 27.92 | 53.65 | 274.84 |
| 鄂尔多斯 | 2880.22 | 1072.74 | 802.63 | 94.22 | 1969.59 | 4849.81 |

表 5 鄂尔多斯盆地油田水中苯系物组成 10⁻⁹

| 井号 | 苯 | 甲苯 | 乙苯 | 邻二甲苯 | 对二甲苯 | 间二甲苯 |
|----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1552.0 | 2555.4 | 162.5 | 391.1 | 803.6 | 117.9 |
| 2 | 528.0 | 181.0 | 73.0 | 90.5 | 483.2 | 148.2 |
| 3 | 13.72 | 1988.2 | 106.9 | 352.0 | 590.1 | 126.7 |
| 4 | 520.0 | 717.9 | 91.3 | 111.2 | 250.1 | 90.5 |
| 5 | 1271.7 | 2034.0 | 0.0 | 426.1 | 536.8 | 235.4 |

表 6 脱气误差统计表 $\mu\text{L/kg}$

| 误差 | 甲烷 | 乙烷 | 丙烷 | 异丁烷 | 正丁烷 |
|--------|---------|-------|----------|---------|---------|
| 最大值 | 730.0 | 53.1 | 20.8 | 5.6 | 6.0 |
| 最小值 | 210.0 | 8.6 | 3.8 | 0.8 | 1.2 |
| 范围值 | 440~730 | 18~43 | 6.4~18.6 | 1.2~5.6 | 1.6~6.0 |
| 平均值 | 515.9 | 31.8 | 11.4 | 3.2 | 3.7 |
| 绝对误差 | 123 | 15 | 5 | 1 | 1.5 |
| 相对误差/% | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |

抽真空、加酸分解、碱溶液吸收 CO₂、恒温脱气的方法及烃类气体制备装置与设备 ,解决了脱气的关键性技术问题 ,重现性和稳定性较高 ,误差较小(表 6)。

上述本土化成果集中体现在 1976 年第一届全国油气化探学术讨论会上。

2 油气化探应用条件的本土化

国外油气化探的技术方法、经验及成果 ,主要是海相地层的背斜型构造油气藏上试验取得的 ,同中国陆相地层油气聚集的特点差异很大 ,使第三系为主油气藏相对具有多、杂、散、小的特点 ,用化探寻找这类地质条件复杂的油气田 ,首先要采取合理的网度 ,按勘查阶段的要求 ,控制住评价目标的空间范围。通过对不同沉积盆地、不同成油体系、不同地表景观条件和不同勘查对象的研究 ,建立了不同勘查

阶段(概查、普查、详查、精查、井中化探)的技术方法系列(包括点、线布置原则、密度、方法组合及评价技术等),表 7 概括地介绍了上述内容。在取样方法上 ,国外以深度为唯一标准 ,前苏联油气化探采样深度在 0.3 ~ 1 m 之间 ,西方国家规定为 3 m。中国在试验中发现 ,深度过浅近地表干扰因素较多 ,大气循环影响较大 ,而过深在许多地区揭露了地下水 ,影响取样质量和速度 ,同时还发现被国外忽视的岩性对化探指标含量的影响远远超过深度因素。通过不同地区大量的 0.2 ~ 30 m 钻孔试验资料证明 ,在中国东部地区采样深度在 1.5 ~ 2.0 m 较为适宜 ,并以颜色较浅、粒度均匀程度高、有机质含量低的亚砂土和亚粘土为主要采样标志层。国外对化探方法的应用在前期是各方法独立使用 ,单独评价 ,近期虽然加强了多方法的综合应用 ,但也是在单方法(指标)评价

表 7 中国东部化探不同勘查阶段技术方法系列

| 勘查阶段 | 概查 | 普查 | 详查 | 精查 | 井中化探 |
|--------|------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 网度 | 线距 2.5 ~ 5 km 点距 1 ~ 2 km | 1 点/km ² | 4 点/km ² | 16 点/km ² | |
| 比例尺 | 1:25 ~ 50 万 | 1:10 万 | 1:5 万 | 1:2.5 万 | |
| 主要化探方法 | 酸解烃、水化学 | 水溶烃、酚—苯系列、酸解烃、紫外—荧光、△C、汞 | 水溶烃、酸解烃、游离烃、同步荧光、紫外导数 | 综合烃类气体(游离、吸附、吸留、水溶、高碳烃)、三维荧光、碳同位素 | 综合烃类气体、同步荧光、三维荧光、高碳烃、碳同位素 |
| 指标组合 | 甲烷—重烃 | 甲烷—重烃、酚—苯系列、F360、U228、△C | 甲烷—重烃光谱特征 | 总烃、重烃、芳烃特征参数、同位素判别值 | |
| 异常确定方法 | 浓度为主 | 浓度与趋势为主 | 增加判别梯度 | 衬度、类比、组构、结构 | 类比、衬度、剥高 |
| 评价目标 | 预测盆地含油气远景 | 指出油气富集有利区(带) | 评价圈闭含油气性或排序 | 确定油气田范围 | 预测和判识油气层 |

后采用叠加的方法进行评价。我国在吸收国外经验的同时,采用了主指标法确定与评价异常,即先对指标分类、筛选,将主要指标变换为无量纲的统一参数,一次性的确定异常,并以次要指标和辅助指标相配合。在综合应用多介质的方法指标时,以水化学主指标确定异常中心,以土介质或其它介质主要指标确定异常边界的联合圈定综合异常的方法。主指标法与组合形式结合,是综合提取油气信息的重要技术措施。第二次本土化成果,主要反映在 1987 年第二届油气化探学术讨论会和石油天然气地球化学勘查技术规范中。

3 油气化探分析测试技术的本土化

在推广应用水化学法和酸解烃法的同时,不断改进传统的沥青法、发光沥青法,随着科学技术的进步和仪器设备的更新,为检测不同介质(大气、水、

沉积物)中与油气化学成分有关的有机物质(尤其是芳烃)提供了条件。古代沉积物(不同地质时代)和现代沉积物(包括海洋、湖沼、河流等)有机质分布特征说明,有机物质丰度与沉积环境成正相关分布,还原程度愈高有机物质越丰富。松辽盆地南部大布苏湖及其周边可溶有机质丰度在 $(200 \sim 500) \times 10^{-3}$ 之间,族组分中以非烃为主,含有一定的芳烃。东营含油凹陷从地表到 50 m 深度内沉积物氯仿抽提物的族组分含量按高低排序是芳烃>非烃>烷烃>沥青质。芳烃含量多在 50% 以上(表 8),表明有机质转化处于芳烃形成阶段,与当地烃源岩在某些类似的转化趋势(趋向芳烃和烷烃方向),同时发现沉积物中烃类气体(尤其是重烃)与芳烃含量有一定的相关关系。据此,化探中心的技术人员,从传统的沥青法和发光沥青法中引伸开发了同步荧光、三维荧光和紫外吸收光谱导数法,直接测定芳烃强度与组

表 8 东营凹陷氯仿抽提物成分组成 %

| 样品号 | 深度/m | 岩性 | 沥青质 | 饱和烃 | 芳烃 | 极性物 | 正构烷 | 有机炭 | 总量/ 10^{-3} |
|-----|-------|--------|------|-------|-------|-------|------|-------|---------------|
| 1 | 0.5-1 | 棕黄色粘土 | 4.10 | 20.55 | 32.42 | 39.62 | 1.09 | 0.13 | 0.245 |
| 2 | 2-4 | 黄褐色粉砂 | 3.23 | 22.77 | 35.38 | 38.62 | 1.58 | 0.249 | 0.379 |
| 3 | 15 | 灰色亚粘土 | 0.55 | 8.32 | 53.71 | 37.42 | 0.55 | 0.463 | 0.369 |
| 4 | 20 | 棕黄色亚粘土 | 0.22 | 6.42 | 68.29 | 25.07 | 1.04 | 0.067 | 0.304 |
| 5 | 26 | 棕红色亚粘土 | 0.42 | 5.12 | 60.83 | 33.63 | 0.90 | 0.076 | 0.361 |
| 6 | 31 | 棕红色亚粘土 | 1.01 | 4.31 | 55.42 | 39.26 | 0.74 | 0.109 | 0.371 |
| 7 | 38 | 灰色细砂 | 0.59 | 6.33 | 60.05 | 33.03 | 0.87 | 0.085 | 0.250 |
| 8 | 42 | 棕色亚粘土 | 0.80 | 8.59 | 67.35 | 23.26 | 0.67 | 0.071 | 0.370 |
| 9 | 49 | 黄灰色粉砂 | 1.98 | 5.75 | 56.21 | 36.06 | 0.46 | 0.06 | 0.252 |

成,在分析测试技术上完成了由过去的粗放型转向精细型,成为当今油气化探有应用潜力的新技术。

烃类气体是油气化学成分的重要组成部分,为提取不同赋存状态的烃气,开拓了热释烃(呈吸附态)的分析测试技术和游离烃的野外取样装置、气体保存技术,进一步完善了综合烃类气体测量。

对于 1983 年美国开发的热解质谱(K-V)法,在吸附丝制作、埋丝(取样)分析测试(居里裂解器热解—气相色谱仪—离子阱进行质谱检测)等方面作了试验和改进,提高了灵敏度,可以进行定性与定量评价,降低了费用,适应于中国自然地理环境。

国外建立的蚀变碳酸盐(ΔC),认为热释温度在 500~600℃下形成的碳酸盐与油气有关。由于中国土壤性质差异较大、碳酸盐类型与成分复杂,引进的 ΔC 分析测试系统有一定的局限性。经多年实践,改进了国外的分析测试流程,建立了高精度、可控、多温阶(250~700℃)连续扫描的分析测试系统,获得了不同温度条件下碳酸盐含量,对认识土壤中碳酸盐的类型、形成、演变及其与油气的关系提供

了有用的信息。此外,通过试验对比,从多种 ΔC 分析仪器中(气相色谱仪、非水容器法、热释差减法等)筛选了红外线气体分析法,该仪器响应灵敏度和重现性零点飘移低于 0.2%,吸收值稳定,线性范围宽, ΔC 含量在 0.06%~10%均可获得理想的分析结果。对分析样品的用量和粒度作了详细试验和改进,在具体运用 ΔC 指标时,排除了相应温度条件下碳酸盐、纹石、大理石、方解石等矿物的干扰。改进后的 ΔC 技术方法具有较高的应用价值。

4 油气化探解释评价技术的本土化

国外油气化探工作者常将指标含量的高值点视为异常。中国化探技术人员经过 20 余 a 的探索逐步认识到指标含量的增高包含着许多不确定因素,除油气影响有关外,还受到地形、地貌、沉积物颜色、粒度、化学成分、现代生物地球化学作用及人文污染等因素的影响,例如化探样品中有机质的含量与烃类气体浓度有明显的同步增长关系(图 1)。表明近代生物地球化学作用对化探指标含量有一定的影

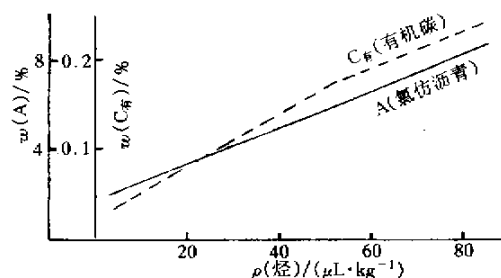


图1 现代沉积物中有机质含量与烃气浓度的关系
响,仅根据指标原始含量的高低确定异常,评价其与油气的关系是不够的。约束干扰,进行定性或定量校正是至关重要的技术措施。近年来,中国油气化探工作者加大了干扰因素研究,取得了重要的进展,提高了化探预测能力,已成为油气化探解释评价技术不可缺少的组成部分。

区域地球化学背景是确定异常和解释评价的基础资料,以含油气盆地为基础单元进行背景研究,从整体上认识区域地球化学空间场的分布特征,体现了盆地控制油气分布的基本规律,能为局部地区异常的确定提供充分的依据,提高了异常的可靠性。这一认识是在分析研究国内外化探背景值确定时,空间范围随意性而具体了的一个方面,其价值与意义已被松辽盆地、鄂尔多斯盆地及南襄盆地等化探成果的有效性所佐证。

在化探异常确定方法上,也由传统的单一浓度方法,拓宽为根据化探不同勘探阶段应用不同或多种方法,如衬度异常、组构异常、结构异常、梯度异常、类比异常、趋势异常、判别异常等,亦就是说指标含量不再是确定异常唯一方法。

化探基础理论研究,从近地表检测油气物质成分及其油气组分简单对比,步向了与井中化探成果、生储盖特征、模拟试验相结合及纵向追踪的道路,为探索晕源关系开辟了新的思路 and 方向。

数据处理技术由研究化探指标相关性的单一数据多元统计法,走向与地质统计法(分析区域变量空间随机性和结构性的关系)结合的道路,使化探数据

的处理、统计与控油(气)的地质因素有机联系在一起,提高了化探的预测能力。建立了全国油气化探数据库,该库具有较高的查询、统计和动态管理功能,为全国性的油气化探研究、可视化技术及地球化学观点的油气资源评价勘查奠定了基础。

综合异常评价在国外定性评价基础上,逐步过渡为数值评价,正向定量评价方向发展。

中国油气化探工作者以丰富的实践资料为依据,发表了大量的学术论文,出版了十余部化探专著。油气化探在本土化道路上发展、创新,逐步形成了适应中国条件的找油气技术方法。

5 结束语

中国油气化探技术方法在 40 多 a 的发展中,虽历经坎坷,但由于坚持走引进、发展、创新的科技道路和学术观点,不囿于旧见,取得了重要的进展,逐步走向规范化和科学化,日臻完善,使化探技术方法具备了解决油气勘查问题的能力。

中国油气化探本土化是全方位的,涉及到该技术的诸多方向,这些都在生产实践和科研探索中,根据中国油气地质特点和科学技术发展水平等,在系统研究总结吸纳其它学科成就日益深化、成熟和发展起来的,成为具有中国特色的找油气技术方法。

中国油气化探有了比较好本土化基础,但还要不断引进新技术、新方法,并通过实践改进它,发展它,为我所用,最终开创油气化探的新局面,将会为油气勘查做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 刘崇禧,赵克斌.油气化探发展中的若干问题[A].见:刘崇禧.油气化探文集[C].北京:地质出版社,1995.
- [2] 刘崇禧,程军,赵克斌.不同勘探阶段油气化探异常的地质意义[J].石油勘探与开发,1999,26(2).
- [3] 刘崇禧,孙世雄.水文地球化学找油理论与方法[M].北京:地质出版社,1988.
- [4] 冯晓双,李贵友.热释气技术在油气化探中应用[J].石油实验地质,1999,2(1).

THE CHINESE CHARACTERIZATION OF OIL AND GAS GEOCHEMICAL EXPLORATION TECHNIQUES: ITS PROCESS AND SIGNIFICANCE

LIU Chong-xi¹, ZHAO Ke-bin¹, CHENG Jun²

(¹ Institute of Petroleum Geochemical Exploration, Institute of Petroleum Exploration and Development, SINPEC, Hefei 230022, China;

² The Graduate School, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(下转 117 页)

THE COMBINATION OF VARIED GEOPHYSICAL TECHNIQUES IN EXPLORING DEEP-SEATED KARSTIC WATER OF SOUTH NINGXIA

WU Yi^{1,2}, GUO Jian-qiang^{1,2}, CAO Fu-xiang², SUN Sheng²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430073, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental geology, CAGS, Baoding 071051, China)

Abstract: Based on the storage properties of deep-seated karstic water in south Ningxia, this paper analyses the test results of the combination of four geophysical techniques in exploring deep-seated karstic water of south Ningxia, and describes the drilling effects. On such a basis, an optimal exploration model for the exploration of this kind of groundwater at present is put forward.

Key words: deep-seated karstic water of south Ningxia; combination of geophysical techniques; optimal model

作者简介: 武毅 (1963 -) 男, 1986 年毕业于武汉地质学院物探系。高级工程师, 中国地质科学院水文地质环境地质研究所地下水勘查研究部副主任, 长期从事水文物探的研究工作。现在中国地质大学(武汉)攻读博士学位。

(上接 109 页)

Abstract: The development of oil and gas geochemical exploration in the past forty odd years has been full of frustrations. We have persisted in introducing techniques from abroad, test and reformation, opening up new roads and bringing forth new ideas, and, as a result, gradually established and formed oil and gas exploration techniques with Chinese characteristics. The Chinese characterization has been realized in such aspects as the sieving of geochemical methods and indices, the study of application conditions, the improvement of analytical technology, and the data processing, interpretation and evaluation. The further introduction of new techniques and methods from abroad, the utilization of the experience of other countries for reference, and the bringing forth new ideas in practice are absolutely necessary to sustainable development of oil and gas exploration.

Key words: oil and gas geochemical exploration; method and index; application condition; test technique; Chinese characterization

作者简介: 刘崇禧 (1937 -) 男, 教授级高级工程师, 现从事油气化探和油田水文地质研究工作, 公开发表论文 73 篇, 专著和与他人合著 5 部。

(上接 112 页)

REE CHARACTERISTICS AND ORE SOURCE STUDIES OF LONGBAOSHAN COMPLEX

XIA Qing-lin¹, CHEN Yong-qing²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: In Mesozoic, Longbaoshan intermediate - alkaline complex was formed as a result of two stages of magmatic intrusion. As shown by statistical analysis of REE in the complex, the total content of $w_{\Sigma\text{REE}}$ is nearly 2.5 times as high as the Clarke value, the ratio of $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ is nearly 9 times that of the crust, and light REE is greatly enriched, whereas Eu and Ce are slightly depleted. The REE distribution patterns of various stages of intrusives and auriferous quartz veins are basically similar to each other, all dipping steeply towards the right. Nevertheless, ΣREE and LREE are richer in auriferous quartz veins than in magnetite. Combined with the geological and geochemical characteristics, the authors conclude that magma and metallogenetic materials of the complex were derived mainly from the same magma chamber in the upper mantle, and assimilated and mixed with the wall rocks during the intrusion of magma into the crust.

Key words: REE, ore source, metallogenetic diversity, Longbaoshan complex

作者简介: 夏庆霖 (1968 -) 男, 2000 年毕业于中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业, 获硕士学位。现为中国地质大学(武汉)讲师, 主要从事数学地质、遥感地质、矿产勘查评价的科研和教学工作, 发表论文 7 篇。

万方数据