石油层上方重金属射流晕分布的数学—物理模型

周子勇¹, О. Ф. Путиков²

(1. 北京大学 城市与环境学系,北京 100871;2. 俄罗斯圣彼得堡矿冶学院 地质系,圣彼得堡 199026)

摘要:通过分析石油层上方形成的重金属元素射流晕,可以确定油气存在的可能性和含油层的水平展布及有关的物理、几何参数。笔者初步建立了这种射流晕分布的数学物理模型,探讨了利用所建立的数学—物理解释实测地 电化学异常的可能性。

关键词:射流晕;地气;地电化学;数学物理模型;石油

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918(2002)05 - 0329 - 05

大量野外观测结果表明,在地球的脱气过程中 重金属 Cu、Pb、Zn、Ni、V、Au 等能够在气体作用下垂 直向上迁移,并穿过厚厚的岩层到达地表甚至是近 地表的大气中。自 70 年代就有学者开始研究重金 属的这种迁移现象,近期对这种现象引起越来越多 的关注。目前研究重金属的这种迁移现象主要有 2 种方法:①地气研究方法;②以前苏联及俄罗斯学者 为代表的地电化学研究方法。80 年代初,前苏联地 球物理学家 Ю. С. Рысс 等运用独创的地电化学方 法来研究地表土壤中运动状态重金属的分布,并提 出了"射流晕"(струйный ореол)概念^[1-3]。野外 观测结果表明,重金属射流晕分布现象不仅存在于 金属矿床上方,同样也存在于油气田上方。本文中, 笔者就石油层上方重金属射流晕分布的特征及其数 学物理—模型进行了初步探讨。

1 石油层上方重金属射流晕分布特征

射流晕概念是由前苏联地电化学家 Ю. С. Рысс 等人在对金属矿的研究中首先提出来的,主要是为 了区别于传统地球化学中的扩散晕。就本质而言, 射流晕也是一种次生晕。它指的是矿体中的运动状 态(подвижный форм)的重金属元素在某种机制 (假设是微气泡的上升)的作用下垂直向上迁移直 达地表,从而在矿体上方形成重金属元素的垂直分 布现象,即射流晕。传统地球化学方法中,研究的是 金属元素的总浓度,这种浓度随距离的增加衰减得 很快。而射流晕研究的对象是矿体中的运动状态的

收稿日期:2001-08-16

基金项目:俄罗斯国家高校基金资助项目

重金属元素,这种状态的重金属元素的含量很小,所 以在地表所测得的浓度也相当小,然而由于垂直迁 移作用,而且迁移的距离相当远,可以把矿体的信息 直接带到地表,因此地表射流晕的分布与矿体在地 表的投影相一致。这样通过对射流晕的研究便可以 更准确地确定矿体的赋存部位。

近年来,俄罗斯全俄地球物理研究所在伏尔 加—乌拉尔及西西伯利亚的两大油气田区的已知油 田上开展了大量的地电化学方法研究^[4,5]。这些方 法包括部分离子提出法、扩散提出法、离子赋存状态 法和热磁地球化学方法^[6]。通过这些方法研究石 油层上方运动状态的重金属元素的分布规律与含油 层关系。大量的野外观测结果表明,石油层上方重 金属的分布有以下特征。

 石油层边缘在地表的投影处重金属含量明显比其它地方高(图1)。特别是对于背斜成因的油 气田,在地表形成的重金属异常等值线与石油层边



图 1 (八小加一与拉小地区呆石油层上方 离子赋存状态法观测结果 1—石灰岩; 2—砂岩; 3—石油层

缘在地表的投影相吻合,并构成一个环状的异常带。

2. 地电化学观测剖面的异常幅值及异常的宽 度与油气田的埋藏深度有一定的关系。关于石油层 上方的重金属元素"射流"分布现象的形成机制,到 目前为止还没有一个确定的解释。俄罗斯地电化学 专家 Ο. Φ. Πутиков 教授^[7]认为,石油层上方运动 状态的重金属元素射流晕的分布与地球内部气体的 向上迁移有关。并提出了形成石油层上方重金属元 素射流晕分布的地质—地球物理模型(图2)。



图 2 石油层上方运动状态重金属元素射流晕形成示意 1-围岩;2-石油层;3-水;4-不透层;5-天然气;6-破碎带; 7,8-携带重金属的气泡;9-不携带重金属的气泡;10-地表地 电化学异常;11-石油水中的微量元素;*z*,*r*-柱坐标;*c*-运动状 态重金属元素浓度

如图所示,在与油气接触的地下水中重金属的 含量比其它地方明显高,当气泡通过含有重金属的 石油水时,地下水中的重金属离子与气泡接合,并通 过气泡上浮把重金属元素带到地表。由于油气田及 其上覆岩层的隔离作用,气泡很难通过油气层,而在 石油层的边缘气泡相对容易通过,因此在石油层上 方的边缘由于气泡的作用,重金属向上垂直迁移,从 而在石油层上方形成重金属的射流晕分布现象。

2 石油层上方重金属射流晕分布的 数学—物理模型

物质在介质中的扩散迁移过程是一个复杂的物 理化学过程,对这一过程进行数学描述是相当困难 的,有时甚至是不可能的。但是另一方面,这个过程 总有一些是规律性的、普遍的现象,经过一定的简 化,对这些现象进行数学描述不但有可能,而且有 用。下面便从均匀介质条件下物质的迁移规律入 手,讨论石油层上方重金属元素射流晕分布的数 学—物理模型。

岩层中金属元素的多相化学过程在许多的文献 中有较系统地研究^[8]。对于在气泡作用下的重金 属元素在孔隙介质中的迁移过程,可以用通用的微 分—积分方程来表示,经简化如式(1)所示:

$$D \nabla^2 c - v_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial z} - \beta \ cq_{\max} \exp(-\beta \int_0^{z} c(z, x, y, \eta) \, \mathrm{d}\eta) + W - \frac{\partial c}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

式中:第一项为扩散项,描述的是扩散作用下物质的 迁移;第二项为对流项,指的是物质在气泡作用下沿 z轴的迁移;第三项描述的是物质迁移过程中的吸 附作用;W为运动状态的源物质浓度;最后一项是 时间项,即浓度随时间的变化;c为孔隙介质中溶于 地下水中的物质的浓度; ∇^2 为拉普拉斯算子; v_{eff} 为 与气泡运移有关的物质垂直方向迁移的有效速度; $v_{eff} = \gamma \alpha v$ (式中 γ 为单位岩石体积内的气泡体积, α 为液相、气相间运动状态金属离子的扩散系数,v 为 气泡垂直迁移速度);D为可溶物质在孔隙介质中的 扩散系数, β 为液体多相反应动力常数; q_{max} 为固相 物质的最大可能浓度; τ 为时间;z,x,y为坐标变量; η 为时间变量。

当 τ →∞ 时,迁移过程为稳定状态,因而有

$$\exp(-\beta \int_{0}^{z} c(z, x, y, \eta) d\eta) \to 0 , \quad \frac{\partial c}{\partial \tau} = 0 \ (2)$$

这样式(1)便简化为

$$D\nabla^2 c - v_{\rm eff} \frac{\partial c}{\partial z} + W = 0 \quad (3)$$

为了建立石油层上方重金属元素射流晕分布的数 学—物理模型,对图2的模型作如下假设(图3)。



图 3 均匀围岩条件下的简化模型

1. 围岩物理化学性质均匀;

石油层与石油水的接触面为在 z = 0(-∞ < z < ∞, z—垂直坐标)的平面上半径为 r₀(油气田的边缘)的圆;

3. 微气泡可以垂直通过均匀岩层,在气泡作用 下物质垂向迁移的速度为 v_{eff} ;

在 z = 0 半径为 r₀ 的圆平面上存在有运动状态的重金属物质源,其浓度为 q(单位时间、单位面积所迁移的物质)。由于气泡作用下物质迁移量比溶液中物质量要少得多,所以假定 q 为常数。运动状态的物质迁移作用是扩散和对流(气泡迁移)。

由于前述油气田及其上覆岩层的隔离作用,重 金属元素在气泡作用下只能沿石油层边缘向上垂直 迁移,又根据以上对模型的假设条件,可以知道物质 源的浓度 W 在 z = 0 的平面上半径为 r_o 的圆的边缘 呈环状分布,即 $W = q\delta(r - r_0)\delta(z)$ 。在柱坐标下 考虑到轴对称条件(物质的浓度分布与方位角无 关)式(3)可写为^[9]:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{D}{r} \frac{\partial c}{\partial r} - v_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial z} + q\delta (r - r_0) \delta(z) = 0_{\circ}$$
(4)

式(4)为石油层上方均匀围岩条件下重金属元素射 流晕分布的数学物理模型,式中的前3项表示物质 的扩散迁移, $\delta(z)$ 为 δ 函数,即

$$\delta(z) = \begin{cases} \infty, x = 0 \\ 0, x \neq 0 \end{cases} \qquad \overleftarrow{B} \qquad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1_{\circ}(5)$$

边界条件为:

 $c|_{|z|\to\infty} = 0$, $c|_{r\to\infty} = 0$. (6) 为了求得方程(4)的解,首先对式(4)就变量 *r* 进行 汉克尔变换,把方程化为简单的偏微分方程,求解后 再进行反汉克尔变换即可得到方程的解,最终得到 浓度 c(z,r)的解析式为:

$$c = \frac{qr_0}{2D} e^{zk} \int_0^\infty \frac{e^{-z\sqrt{k^2 + \rho^2}}}{\sqrt{(kr_0)^2 + \rho^2}} J_0(\frac{r}{r_0}\rho) J_0(\rho)\rho d\rho \quad (7)$$

式中 $k = v_{eff}/2D$ 称为射流系数,该系数与围岩的物理化学性质有关。

从上式可知,射流晕中重金属元素的浓度分布 主要与水中重金属含量(q)、石油层的分布(r_0)、与 石油层的垂直距离(z)及围岩的物理化学性质(k) 有关。为了计算方便,把式(7)表示为无量纲的表 达式:

$$Y = \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-z_{1}(\sqrt{b^{2}+x^{2}}-b)} J_{0}(r_{k}x) J_{0}(x) x dx}{\sqrt{b^{2}+x^{2}}} \quad (8)$$

式中 $Y = 2Dc/q, x = r_o\rho$, $b = kr_o$, $z_1 = z/r_o$, $r_k = r/r_o$. 相保式(7) 式式(9) 可以或得力怎么你的意义。

根据式(7)或式(8)可以求得在气泡作用下石

油层上方均匀围岩中重金属元素的浓度分布。当实际围岩的物理性质随深度的变化不大时,可以把它 看成是均匀的,从而可以通过上式近似求解。然而, 实际情况比这要复杂得多。实际中石油层上方的围 岩多数情况下是水平层状或近似水平层状分布,在 这种情况下可以根据物理性质把围岩划分成多层水 平介质组成的层状空间,那么从理论上讲是可以建 立起相应的数学—物理模型,只是层数越多越复杂。 显然,最简单的层状模型是二层模型。以下讨论二 层水平介质中射流晕分布的数学—物理模型。

假设条件同前。由于石油层只分布在下层介质 中,即物质源只来自下层,而上层介质中不存在物质 源,因此石油层上方重金属元素在不同层的浓度 *c*₁ (下层)、*c*₂(上层)分布可表示为^[10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 c_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 c_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c_1}{\partial r} - \frac{v_1}{D_1} \frac{\partial c_1}{\partial z} + \\ \frac{q}{D_1} \delta \left(r - r_0 \right) \delta(z) = 0 , \qquad (9) \\ \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c_2}{\partial r} - \frac{v_2}{D_2} \frac{\partial c_2}{\partial z} = 0 , \end{cases}$$

式中: v_1 和 v_2 是在下层和上层介质中气泡作用下物 质沿垂直方向迁移的有效速度(此处省略下标_{eff}), D_1 和 D_2 是在下层和上层介质中物质的扩散系数, 其它变量意义同(3)、(4)式。

边界条件可表示为:

$$c_1 |_{z=H} = c_2 |_{z=H}, \qquad (10)$$

$$c_1 \mid_{z \to -\infty} \to 0$$
, $c_2 \mid_{z \to \infty} \to 0$, (11)

$$c_1 |_{r \to \infty} \to 0$$
, $c_2 |_{r \to \infty} \to 0$, (12)

$$\left(v_1c_1 - D_1 \frac{\partial c_1}{\partial z}\right)\Big|_{z=h} = \left(v_2c_2 - D_2 \frac{\partial c_2}{\partial z}\right)\Big|_{z=h} \circ (13)$$

(10)式中的 h 为介质分界面到石油层的垂直距离。 方程组(9)的求解方法与方程(4)的求解方法相同。 最终得到石油层上方二层围岩中运动状态的重金属 元素在上层和下层围岩中的浓度分布 c_2 及 c_1 的无 量纲表达式 Y_1 及 Y_2 :

$$Y_{1} = \frac{2D_{1}c_{1}}{q} = \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_{1}r_{0}}{2D_{1}}\right)^{2} + x^{2}}} \left[e^{-\alpha_{1}^{*}\frac{z}{r_{0}}} + \frac{\alpha_{1}^{*} + \frac{v_{1}r_{0}}{D_{0}} - \frac{v_{2}r_{0}}{D_{1}} - \frac{D_{2}}{D_{1}}\beta^{*}}{\alpha_{2}^{*} - \frac{v_{1}r_{0}}{D_{1}} + \frac{v_{2}r_{0}}{D_{1}} + \frac{D_{2}}{D_{1}}\beta^{*}} e^{-\alpha_{1}^{*}\frac{h}{r_{0}}} e^{-\alpha_{2}^{*}\frac{(h+z)}{r_{0}}} \right] J_{0}(\frac{r}{r_{0}}x)J_{0}(x)xdx , \quad (14)$$

$$Y_{2} = \frac{2D_{1}c_{2}}{q} = 2\int_{0}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_{1}^{*}\frac{h}{r_{0}}} e^{-\beta^{*}\frac{(z-h)}{r_{0}}}}{\alpha_{2}^{*} + \frac{v_{2}r_{0}}{D_{1}} - \frac{v_{1}r_{0}}{D_{1}} + \frac{D_{2}}{D_{1}}\beta^{*}} J_{0}(\frac{r}{r_{0}}x)J_{0}(x)xdx , \quad (15)$$





图 4 石油层上方均匀围岩中重金属元素浓度等值线 1—石油层:2—石油层边缘在水平面的投影;图 5 同



图 5 石油层上方二层均匀围岩中重金属元素浓度等值线 $k_1 = 0.01 \text{ m}^{-1}, k_2 = 0.001 \text{ m}^{-1}, D_1 = D_2, r_0 = 5\,000 \text{ m}, h = 1\,000 \text{ m}$

图 4、图 5 分别为在给定条件下均匀围岩及二 层围岩中重金属射流晕在垂直及水平剖面上的分 布。在均匀围岩的垂直面上重金属元素浓度呈射流 晕分布,其在水平面上与石油层边缘的投影相吻合。 在二层围岩的垂直面上重金属元素在两层围岩分界 处的浓度变化很大,但在水平面上仍与石油层边缘 的投影相吻合。以此类推,可以建立石油层上方三 层或三层以上的围岩条件下重金属射流晕浓度分布 的数学—物理模型及其相应的解析解^[12]。

4 数学—物理模型在实际中的可能应用

如前所述,野外地电化学测量结果表明,地电化 学异常幅值及异常半极值宽度与油气田埋藏深度存 在一定的关系。假设已知测区的地质条件,则用 (8)式或(14)、(15)式可以得到测区地电化学异常 半极值宽度与油气田埋藏深度的关系曲线(图6)。

如果在勘探区已知不同的油气层的埋藏深度及



图 6 不同 k 条件下石油层埋深与异常半极值宽度的关系

其对应的地电化学异常,则通过理论曲线与实测结 果拟合,可以建立起已知油气田区石油层埋深与异 常半极值的关系,利用这种关系便可以推测已知区 待测油气层的埋深。

图 7 为在西西伯利亚及伏尔加—乌拉尔油气田 地区各已知油气层上方地表离子赋存状态法观测到 的地电化学异常半极值宽度与对应的油气田埋深的 关系及其与理论曲线的拟合结果。由图可见,在伏 尔加—乌拉尔油气田区,地电化学异常半极值宽度 与油气田的埋藏深度的关系曲线与均匀围岩条件下 理论曲线相拟合($k = 0.08 \text{ m}^{-1}$)。而对于西西伯利 亚油气田区,实测曲线与二层围岩条件下($k_1 = 0.03 \text{ m}^{-1}, k_2 = 0.005 \text{ m}^{-1}$)的理论曲线相接近。



图 7 石油层埋深与异常半极值宽度关系 理论曲线与实测数据分布

1一伏尔加—乌拉尔地区实测数据;2—西西伯利亚实测数据;
 3一均匀围岩条件下理论曲线;4—二层围岩条件下理论曲线

如果实测地电化学曲线比较规则,那么可以直 接对实测的地电化学曲线进行拟合,从而可以得到 观测区石油层的几何及物理参数^[12]。图 8 为在伏



图 8 伏尔加—乌拉尔地区某石油层上方 Ni 地电化学实测含量与理论曲线

尔加—乌拉尔油气田区某已知石油层上方采用离子 赋存状态法实测的 Ni 异常曲线与理论曲线的拟合 结果。已知 $z = 1 \ 825 \ m, 2r_0 = 1 \ 566 \ m, h = 60 \ m, 拟$ 合结果为 $k_1 = 0.1 \ m^{-1}, k_2 = 0.1 \ m^{-1}, D_2/D_1 = 0.05$ 。 由图中的拟合结果可以看出,在给定的参数条件下, 理论曲线与实测结果拟合得很好。

5 结论

根据以上分析可以得出以下结论。 1. 由于石油层上方运动状态的重金属元素的 来源与含油层有关,因此通过分析石油层上方重金 属元素的射流晕分布可以确定含油构造中石油存在 的可能性。

 源于与石油层有关的重金属元素集中在石油层边缘上方垂直分布,并且在石油层边缘在地表的投影处形成峰值。因此通过对重金属元素的射流 晕的分析可以确定石油层的水平展布。

3. 所建立的数学物理模型可以定性或半定量 地解释地表观测到的地电化学异常,初步确定石油 层的物理、几何参数。对于石油层上方重金属元素 的射流晕分布的数学物理模型的研究,笔者仅仅做 了一个初步探讨。

文中的资料来自于俄罗斯全俄地球物理研究 所, 笔者对 С. В. Вешев, С. Г. Алексеев, К. И. Степанов 等人的支持表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Рысс Ю С, Гольдберг И С, Алексеев С Г, и др. Струйная миграция вещества в образовании вторичных ореолов рассеяния [J]. ДАН СССР, 1987, 297 (4):956 – 958.
- [2] Путиков О Ф, Ермохин К М. Теория "струйных" ореолов рассеяния в методе ЧИМ для однородных вмещающих горных пород[J]. Вопрос геофизики, 1994, (33):159-164.
- [3] Путиков О Ф, Духанин А С, Машьянов Н Р. К обоснованию физико-математической модели " струйных " ореолов рассеяния [J]. Российский геофизический журнал, 1994, (2):5 – 10.

- [4] Васильева В И, Ворошилов Н А. Оценка перспективности площадей на нефть геоэлектрохимическими методами [J]. Геофизика, 1995, (2):29-36.
- [5] Рысс Ю С, Гольдберг И С, Васильева В И, и др. Возможность применения геоэлектрохимических методов для поисков нефтегазовых месторождений [J]. Советская геология. 1990, (6):28 – 33.
- [6] Путиков О Ф. Геоэлектрохимические методы поисков и разведки[М]. С. – Петербург:СПГГИ,1993.117.
- [7] Путиков О Ф, Духанин А С. О возможном механизме формирования " струйных" ореолов рассеяния [J]. ДАН, 1994,338(2):219-221.
- [8] Голубев В С, Гарибянц А А. Гетерогенные процессы геохимической миграции [М]. Москва: Недра, 1968, 192.
- [9] Путиков О Ф, Вешев С А, Ворошилов Н А, и др. Струйные ореолы рассеяния тяжелых металлов нефтегазовых месторождений и их использование при оценке параметров залежей [J]. Докл. АН, 2000, 370(5):668 – 671.
- [10] Путиков О Ф, Вешев С А, Алексеев С Г, и др. Струйные ореолы рассеяния над нефтегазовыми залежами в неоднородных порода[J]. Геофизика. 2000, (1):52 – 56.
- [11] Чжоу Цзыюн, Путиков О Ф, Касъянкова Н А. Возможности оценки параметров нефтегазовых залежей путем решения обратной задачи геоэлектрохимических методов [J]. Сборник трудов молодых ученых, Санкт – Петербургский Государственный Горный Институт, 1999, (4):24 – 26.
- [12] Чжоу Цзыюн. Струйные ореолы рассеяния нефтегазовых месторождений в неоднородных горных породах и их изучение геоэлектрохимическими методами [D]. Диссертация кандидата, Санкт – Петербургский Государственный Горный Институт, 2000.

A MATHEMATICAL – PHYSICAL MODEL FOR THE DISTRIBUTION OF HEAVY METALLIC EFFUSIVE HALOS OVER THE OIL RESERVOIR

ZHOU Zi-yong¹, Putikov O F²

(1. Department of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Department of Geology, Saint Petersburg College of Mining and Metallurgy, Saint Petersburg Russia)

Abstract: Through the analysis of the heavy metallic effusive halos over the oil reservoir, we can get to know the probability of the existence of oil and gas and determine the horizontal distribution of the oil reservoir as well as the geophysical and geometric parameters. The authors have tentatively constructed a mathematical-physical model for the distribution of such effusive halos and probed into the possibility of applying this model to interpreting measured geoelectric chemical anomalies.

Key words: effusive halo; geogas; geoelectric chemistry; mathematical-physical model; petroleum.

作者简介:周子勇(1965-),男,2000年毕业于俄罗斯国立圣彼得堡矿冶学院地质系并获得博士学位。现在为北京大学城市 与环境学系博士后,研究方向为地电化学方法在环境研究中的应用。