

利用地表天然 γ 射线找地下水

金可则 余伯雄

(四川省核技术应用研究所) (四川省水利局)

利用地表天然放射性的相对变化,探测浅层基岩中的裂隙地下水脉,是核技术应用的一项新的进展。

本文介绍的是近几年来,我们在四川中部红层丘陵山区的试验应用效果,对它的基本原理、应用方法、仪器、排除干扰等问题进行了初步探讨。

在自然降水不均衡,地表径流缺乏,引水困难的干旱丘陵山地,就近开发地下水源,是解决农田灌溉和人民生活用水的重要途径。

地下水资源丰富,比较稳定,开发利用占地少,见效快,不易污染,日益引起世界各国的重视。但是在干旱的丘陵山区基岩地带,地下水主要贮存在裂隙和破碎带中,由于它们的不规则分布,用一般地质勘探方法,成效是不高的。据报导^[1],日本在干旱的山麓和盆地边缘坡地,利用天然放射性探测地下水源,在用一般方法找不到地下水的地方,找到丰富的地下水。七十年代,他们在飞机和汽车上安装自动记录仪探测地表天然 γ 射线,寻找地下水源,也取得良好效果。

四川省农业耕地大部分在盆地内丘陵低山地区,干旱是主要自然灾害,迫切要求加快地下水的开发利用。我们从1974年底开始利用地表天然 γ 射线勘测地下水的试验工作。四年多来,主要在三个方面开展工作:

- ① 从有关基本科学原理和核探测技术方面考察这种新技术的科学性;
- ② 从我国实际出发,研究试用比较简单的 γ 闪烁计数率计,和单人徒步探测法的效果;
- ③ 结合抗旱,进行实际应用试验,考察这项新技术的作用,探索和掌握有关应用的规律。

现将我们的工作简要介绍如下:

一、基本原理和探测技术

日本落合敏郎等认为^[1],在干旱丘陵山麓地带,断层、破碎带和裂隙中含有地下水,是唯一可以利用的地下水源。其理论的主要依据是,由于地下水溶解有较多的铀盐、镭盐等放射性物质,经过断层、破碎带、裂隙,渗透到表土层,使这些放射性物质在附近的表土中不断析出、扩散、沉淀,造成放射性增强现象;用比较灵敏的放射性探测仪,从周围的天然背

景中把它识别出来,从而找到地下水贮水构造带。从我们的大量试验中,证明这种现象是存在的。在地球岩圈中,存在的天然放射性同位素 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 同它们的衰变产物一起,包括呈射气形态的 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 、 ^{219}Rn 等,产生大部分地表天然放射性射线。其余部分的射线是 ^{40}K 放出的。这些放射性物质,特别是铀,具有较强的分散性、亲岩性、亲水性、亲氧性等特性。在氧化过程中,由于渗透水,特别是酸性水的作用,大量的铀分散后变成化学性稳定的各种化合物。因此,地球浅层岩圈普遍存有这些微量放射性物质^[3]。

表1. 岩石中天然放射性物质含量(单位为微微居里/克)(根据不同作者调查数据的平均值)

岩石种类	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
岩浆岩	0.5/1.4	1.3/3.5	1.3/3.7	22/25
花岗岩	1.4/3	2.3/13	3.1/2.6	29/30
硷性溶岩	0.9	~3	—	—
酸性溶岩	5	~15	—	—
玄武岩		1.0	0.5/1.1	8/11
砂岩	0.4	0.7	0.15/0.7	9
页岩	0.5	0.14	0.4	2.3
石灰岩	0.5	0.1/0.15	0.4/0.7/1	2.3/2.5

1克均匀的地壳物质中,约含有3ppm铀,10ppm钍和2.5%的钾。铀的广泛性,几乎到处都有。铀的多价性,大的原子半径,高度化学活动性,在水溶液中铀的六价化合物的较高溶解度,铀的原子价变化容易生成络合物,可以在广泛变动的化学条件下,被水溶液带走。在浓度较低时,铀酰离子很稳定,甚至在浓度较大时,在使它沉淀的溶液里,也是很稳定的,因此,地下水在运动过程中,可以溶解较多的放射性物质,在水压力下,通过岩石裂隙和孔隙,把它送到表土层。在这里,又因土壤的吸附,特别是含铝和铁的岩石风化后,更易于吸附和贮存放射性物质;含碳页岩、石灰岩中有机物质,能使铀还原成不溶解的二氧化铀(UO_2)或因表面活性而吸收铀,组成不溶解的含铀有机化合物,从而不断富集。这些放射性物质与地下水及裂隙、破碎带的相互关系和作用机理,是构成这种找水方法的基本原理^[4]。 γ 射线,有很强的穿透力,但在基岩复盖层下,一般穿透力在1米左右;在地表探测到的天然 γ 射线,有相当部分是氡射气的作用。当气压不断增高或扰动引起的气体的运动还可增大许多倍,这样也可以使它衰变成的辐射体在地表产生 γ 异常^[5]。

我们在成都、内江、安岳、中江、隆昌等地的红层基岩地区,对出露地下水附近作 γ 射线强度测定,一般比周围岩石、土壤和地表水高1.1~1.5倍。1975—1976年初,我们在简阳、内江、成都、彭山等地对已打成的20口井,试用NE1700型普适闪烁计数率计试测 γ 强度异常,发现这些井中地下水的有否和多少,大抵上同井位附近有无 γ 增强,有一个正相关的表现。(见表2)

表2表明:高店子一号井,附近有条 γ 增强带(约增高1.4倍)通过,井的出水量约400吨/日,二号井附近没有 γ 异常,是干井。

表 2. 不同井位 γ 增强与浅层裂隙水的关系

井 位 地 点	γ 增 强 (倍)	井 深 (米)	出 水 量 吨/日
简阳棉丰公社一号井	1.5	33	~200
简阳棉丰公社二号井	1.2	30	少 量
简阳棉丰公社三号井	无	60	无
内 江 邓 家 坝 井	无	40	无
内 江 民 井 二 口	1.5	泄出地下水	自流泉水
彭山和平公社战斗井	1.44		自流泉水
彭山和平公社红卫井	1.5		1000 以上
龙 潭 寺 二 号 井	1.44		400~1000
高 店 子 一 号 井	1.4		~400
高 店 子 二 号 井	无		无

以上这些试验证明：这种探测地下水的新方法，对寻找基岩地区的含水裂隙带，比较准确、简单、快速。采用轻便、可携式计数率计辐射仪，由单人徒步操作，这在山区无疑是比较受欢迎的找水方法。

二、应用和验证

在以上试验初步成功的基础上，从 1975 年底开始，结合抗旱需要，进行应用性的试验找水和打井验证，进一步考察它的准确性和应用效果。主要试验井都选择在地下水比较缺乏的川中红层丘陵地区，以及用其它勘探方法不容易找到地下水的深丘和山地。如龙泉山的高坡地带。

经过试测近百个井位，基本上都反映出一种规律性：即地表天然 γ 射线增强明显，并形成与水文地质条件相符合的异常带，在这个带上选择的井位（一般 γ 强度增高 1.3 倍以上），都有较丰富的浅层裂隙水； γ 增强不明显的井位，一般都没有裂隙水或只有很少量的裂隙水，甚至完全无水。（见表 3）

集风一号试验井，电测法认为有水， γ 探测无明显增强反应，只有微量渗透水。集风二号试验井，在较高的山坡， γ 增强不到 1.2 倍，宽度很窄， <1 米，钻到 30 米左右，浅层干裂隙较发育，也只有微量水。

中江新坪公社邹家湾一号试验井， γ 射线增强度达到 1.5~1.7 倍， γ 增强带从山上崩塌体延伸下来，宽度达到 6 米，判断可以出大水，但电测法无反应。钻井 6—10 米，在砂岩层中，发现巨大裂隙，并可看到地下水通道的水垢遗迹，到 25 米处，又发现大的砂岩裂隙，28 米处开始出大水，静水位上升到 15 米，经作抽水试验，日出水量约 1500 吨左右。1978 年干旱严重期间，每天可以保持连续抽水 1200 吨。保证周围数百亩农田灌溉用水，夺得农业大丰收。（见图 1、2）

中江通山公社九大队六队干沟的坡上，试测的试验井，在走石沟山坡边，从四条勘测线

表 3. 十口试验井效果分析

试 验 井 地 点	地 形 地 貌	地 层 岩 性	井深(米)	出 水 量 (吨/日)	γ 增 强 (倍)
中江新坪一号井	龙泉山脚坡上	泥页岩、砂岩、泥岩	31	1500	1.5
中江通山公社走石沟	沟头坡边	砂页岩	18.7	~300	1.36
中江新坪岩脚山井	龙泉山谷地坡上	泥岩、砂岩、页岩	22	~100	1.3
盐亭林山公社缺口堰	丘陵坡上	砂页岩	36	50	1.5
德阳旌阳公社龙家湾	丘陵坡上	砂页岩	30	50	1.4
成都两河公社一号井	龙泉山褶皱山麓	砂岩、泥岩、页岩	38	40	1.33
成都大面铺一号井	丘陵坡上	砂岩、泥岩、页岩	70	20	1.26
成都大面铺二号井	丘陵坡上	砂岩、泥岩、页岩	70	~100	1.4
中江集风场镇电测对照一号井	龙泉山褶皱山麓	砂岩、泥岩、页岩	44	3.2	1.1
中江集风场镇电测对照二号井	龙泉山褶皱山麓	砂岩、泥岩、页岩	40	<2	1.2

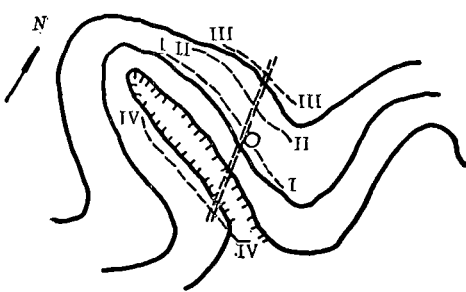


图 1. 中江五里坡新坪公社邹家湾一号试验井 γ 测线简图
---测线, === γ 增强带, ○ 测定井位。

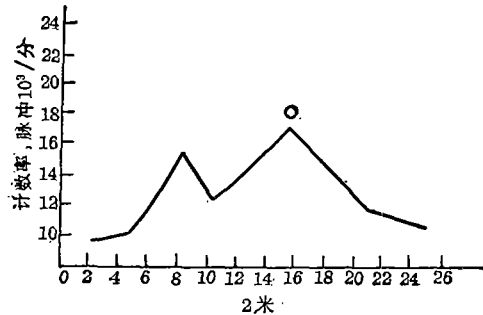


图 2. 邹家湾一号井第一测线 γ 曲线

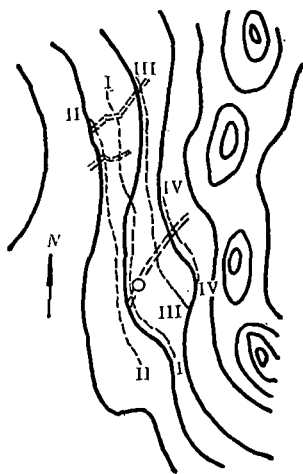


图 3. 中江通山公社一号试验井 γ 测线简图
---测线, ===增强带, ○ 井位。

发现一条 γ 增强带,由北东/南西方向自山上伸到沟中浮土层, γ 强度逐渐减弱,井位附近 γ 增强的宽度由3米增大到6米以上,增强的峰值1.36倍,据此判定有一股地下水顺着增强带运动,钻井十米左右,在预定来水方向出现一股较大的裂隙水,水量约300吨/日,静水位1.7米,基本解决整个沟浇灌用水。

有一个对照井,是用其它勘探方法选定的,深26米,原估计出水量约20吨/日,但经测定却无明显的 γ 增强异常,在靠近塘边的方向, γ 约增加1.1倍,后来把井边的塘内水抽干,井内水也干了。(见图3、4)

中江石泉公社八大队四队试验井,在海拔1000公尺老牛坡西麓,属于龙泉山褶皱地带,是一个没有地表迳流,全靠自然降水的

干旱地带,过去打过十口井,深度7—11米,除一口有一点水外,其余都没有水。我们对这个地区进行九条测线的 γ 探测,找到一条南南东/北北西方向的 γ 增强带,峰值1.37倍、宽度3—5米,在井位附近有三个峰值靠近。经人工挖井4米左右,在 γ 增强带方向涌出裂隙水,出水量约5吨/日,静水位约1米,解决了坡上群众的生活用水。(见图5)



图4. 通山公社一号试验井第一测线 γ 曲线

盐亭县林山公社二大队五队缺口垭干沟上,从八条测线上,找到二条较明显的 γ 增强带,其中北东/南西 γ 增强带上,有一个才挖的沼气池,已流出较丰富的地下水。另一条 γ 增强带,北北东/南南西,峰值为1.5倍,宽度2米左右,是在山坡上。钻井2米,开始出水,到十米出水量显著增大,随着深度增大,水量也增大。因钢件掉入井中,在36米处停钻,初测出水量50吨/日以上,在这个增强带的北东方向,即缺口垭公路边钻井,井深13米,出水约40吨/日。但在附近没有 γ 增强的地方打的两口井,都没有水。(见图6、7、8、)

采用地表天然 γ 射线增强的变化寻找地下水,在实际应用中,必须对所测定的地下水带的丰水性作相对的估计。只有这样才能使打成的井有比较理想的水量。根据我们的经验,在充分注意地下水补给源和储水构造等水文地质条件的同时,还可根据地表 γ 增强带和地下水量之间的正相关的关系,来判断一个井位的相对丰水程度。亦即,在地形、地质条件基本一致的情况下,浅层裂隙水量通常是与 γ 增强峰值和宽度的平方乘积成正相关的近似关系,如地下水的通道性能,常数为 K , γ 增强峰值为 R ,宽度为 S ,则地下水量近似相对值 W ,即

$$W \approx K \cdot R \cdot S^2$$

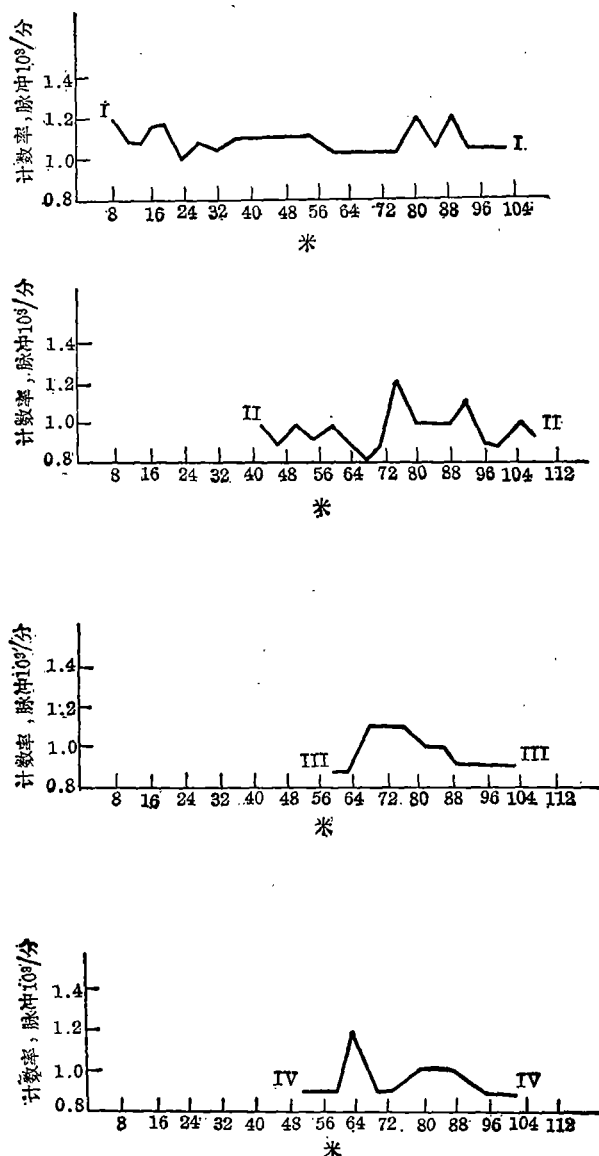


图5. 石泉公社八大队四队试测井 γ 线曲线

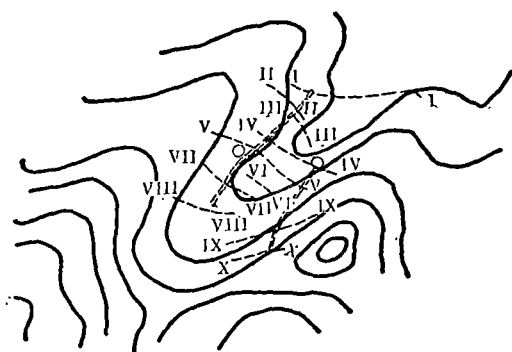


图6. 盐亭林山公社一号试验井 γ 测线简图
---测线, ===增强带, ○井位。

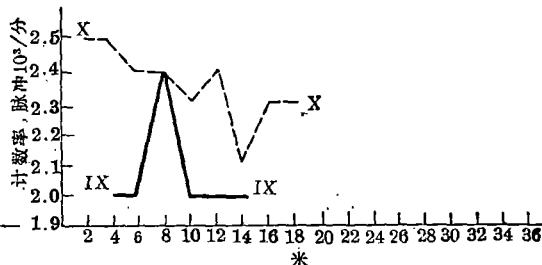
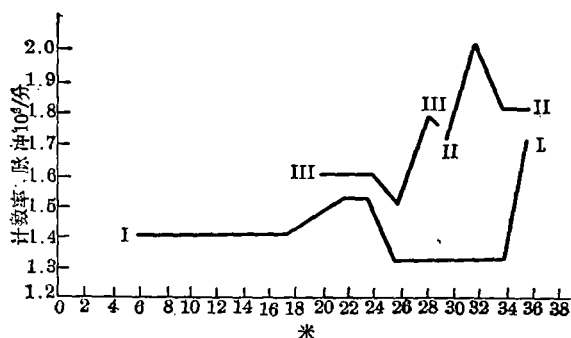
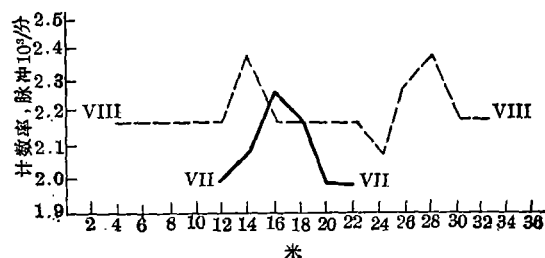
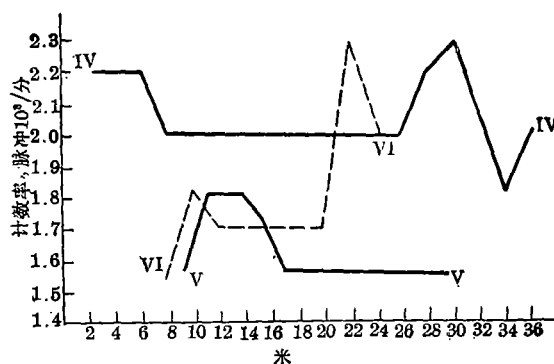


图7. 林山公社一号试验井测线 γ 曲线

图8. 林山公社一号试验井测线 γ 曲线Ⅶ—Ⅹ

从表4可以看出 γ 增强带峰值是衡量浅层地下水有无的重要标志,而峰值的宽度是衡量地下水大小的一个重要标志;一般要求 γ 增强峰值 >1.3 倍,宽度 >2 米。如它们的乘积 W 值越大,则水量的相对丰度也越好(见表4)。有不少在山丘高坡的试验井, γ 增强峰值较高,而宽度狭窄,相对出水量较小。

三、探 测 仪 器

在地表天然放射性元素分布比较均匀的基岩地区,当地表覆盖层不超过10米,地表 γ 射线的变化往往在10微伦/小时到20微伦/小时,对探测仪器的灵敏度和准确度要求比较高。在野外,使用灵敏度较高的通用闪烁辐射计,基本可以达到要求。通常要求的灵敏度和精确度,能够保证分辨出环境本底放射性的10%左右的变化。地表天然 γ 射线主要是低能范围,采用总量计数测量。如果能对铀等作能谱测量,进行校正,效果可能更好。灵敏度较高的计数率计可测出在每秒几个至几十个脉冲之间的变化。天然 γ 射线计数上有自然涨落的特性,计数不很大时,呈泊松分布,均数大时接近高斯分布。在野外测量时,时间 t (秒),总计数

表4. γ 增强带峰值、宽度与裂隙水量比较

序 号	试 验 井 地 点	地 形 地 貌	γ 增强 (倍)	宽 度 (米)	井 深 (米)	W值	出 水 量 (吨/日)
1	中江新坪公社 I 号井	龙泉山麓坡上	1.5	6	31	54.0	1500
2	中江新坪公社凉水井	龙泉山麓沟边	1.33	3	20	11.7	200
3	中江新坪公社匡家湾井	龙泉山上坡边	1.3	2	22	5.2	780
4	中江通山公社 I 号井	丘陵坡上	1.36	6	18.7	48.9	300
5	中江集风 I 号井	龙泉山坡上	1.17	2	44	4.6	~3
6	中江集风 II 号井	龙泉山坡上	1.2	1	33	1.2	<1
7	成都大面铺 I 号井	丘陵坡上	1.26	1	80	1.26	20
8	成都大面铺 II 号井	丘陵坡上	1.40	2	80	5.6	~100
9	成都大面铺对照井	丘陵沟底	无		80	0	0
10	成都龙泉山 I 号井	龙泉山坡上	1.4	2.5	45	8.6	~100
11	成都龙泉山 II 号井	龙泉山坡上	1.33	1.5	38	2.86	40

N , 均数为 $\bar{n}$, 则标准误差计算近似 $\pm \sqrt{\frac{N}{t}}$ 。一般说来, 作为相对测量, 能够将地下水的地表 γ 增强与周围天然背景的 γ 强度差异识别出来, 就可以应用。若仪器的分辨本领达不到要求, 就没有效果。使用灵敏度高的仪器可以找到 γ 增强带, 而灵敏度低的仪器, 没有反应。在野外作业中, 还要求仪器具有轻便、可靠、坚固、防潮、抗震、不易受温度变化影响等性能。

四、探 测 方 法

浅层基岩裂隙地下水宽度一般较窄, 反映在地表的 γ 增强带大多在 2 米左右, 个别也可以达到 10 米以上, 而且这种微弱的异常一般都要求在地面岩性比较均匀的条件下, 才能找到, 要量出 γ 射线增强带的宽度, 更要求作精确的测量。因此, 对测线的设计, 必须周密、合理, 不要漏掉异常, 要考虑均匀性和各种干扰因素的影响, 结合地形、地质构造的实际情况, 采取平行与网式探测, 因地制宜地进行。由于山区地形条件差别较大, 在选定测线时只能尽量求得相对均衡。在小范围内的勘测, 初测间距 2 米左右, 也可以根据实际条件调整, 发现 γ 射线强度增高趋势, 要缩短间隔距离, 进行精测和加密测线, 找出地下水脉, 然后, 在 γ 增强带的峰值和较宽的地带确定井位, 同时, 应从水文地质的观点加以核对, 进行综合分析, 即“远看地形、近看地质、仪器定位”。这样也有助于区别放射性矿藏带和地下水脉, 以及其它干扰。

在小范围内, 对地面 γ 射线的强度作相对测量, 对宇宙线的高度效应的影响, 可以忽略。

大地的相对均衡条件, 往往只有在认真排除各种天然和人为的干扰因素, 才能得到。各种表土、岩层所含的放射性 γ 强度是不同的。不同的温度、湿度、复盖层、人为的污染 (如煤渣等)、仪器探头的测量位置、角度、地面的不同几何形状、房屋、陡坡壁等, 都会发生不同程度的影响, 有的差异可以达到 1.2 倍以上。(见表 5 图 9) 厚层的表土、地表水面, 甚至

表5. 一个复杂的测线上 γ 本底差异与实际增强度的确定

测线上 γ 值变化	大 气	公 路	黄 泥	泥 砂 岩	砂 岩	泥 页 岩	地下水出露点
背景值 (脉冲/秒)	11.2	12.6	15.5	15.5	11.8	15.1	19.4
增强带 (脉冲/秒)		15.5		17.2	14.2	18.3	
增强度确定 (倍)		1.21		1.11	1.2	1.21	

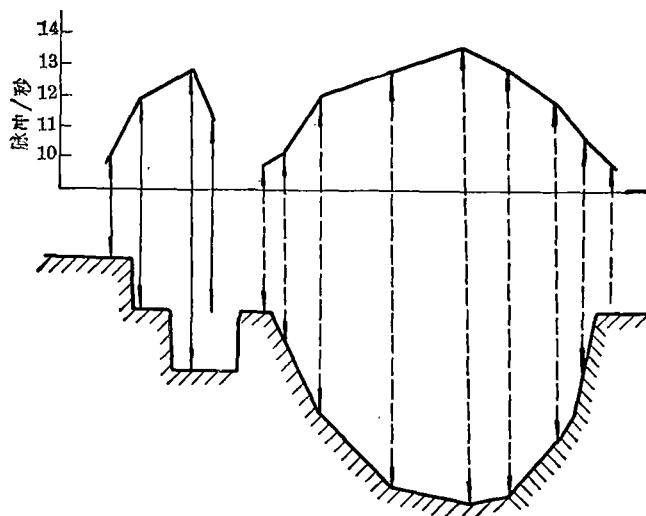


图9. 地表不同位置探测的 γ 强度差异曲线

可以完全吸收含水裂隙产生的 γ 射线的增高反映,形成“盲区”。必须采取措施予以排除,或使各种干扰影响降低到不影响测量结果的允许范围内,如安排表土比较均衡的测线,事先查明不同岩层的 γ 强度差异,加以排除,避开地表积水和厚覆盖层等屏蔽射线较强的地区。如条件许可,还可用其它勘探方法结合进行,以便取长补短,互相验证。

五、小 结

1. 利用地表天然 γ 射线的增强现象,探测浅层基岩裂隙地下水源是放射性示踪、核射线探测技术,放射性水文地质学等多种学科相结合而发展起来的一项新的应用技术,在干旱的丘陵山区寻找断层、破碎带、裂隙地下水有比较好的效果。它具有准确、操作简单、仪器轻便、易于推广应用等优点。

2. 根据大量试验结果,在水文地质条件大致相同时,地表天然 γ 射线的增强带的峰值和宽度的平方乘积与地下水丰度有正相关的表现。因此,可以用它来估算井位出水的相对概量,对指导寻找比较丰富的地下水源,是有一定意义的。

参 考 文 献

- [1] 落合敏郎,原子力工业,10,1,73 (1964).
- [2] 郭承基,放射性元素矿物化学,科学出版社,1959,第30页.
- [3] 国际原子能机构和世界卫生组织编,辐射血液学手册,原子能出版社,1975,第6页.
- [4] S. H. 鲍伊等,国外铀矿普查与勘探,原子能出版社,1977,第105页.
- [5] 苏联科学院情报研究所编,原子能原料地质,地质出版社,1958,第90页.
- [6] 苏联科学院情报研究所编,原子能原料地质,地质出版社,1958,第421页.
- [7] R. H. Brown et al., Ground-water studies, UNESCO, Paris, 1972, p. 3.

(1978年9月15日收到)