

# 氡气测量在佳木斯城市地下热水普查的应用

刘菁华, 王祝文, 王晓丽, 易兵, 赵玉岩

(吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 在佳木斯城区地下热水调查中, 运用了水中氡活度浓度测量和土壤氡活度浓度测量综合方法, 有效地克服了城市地热地质调查中的不利因素。通过对水中氡活度浓度及土壤氡活度浓度测量值的正态化变换以及原始氡活度浓度异常分析, 明确了氡活度浓度异常对地下热水控制构造的指示作用。通过对氡活度浓度测量值的趋势分析, 提取局部异常, 综合各种异常信息, 确定了城区地下热水的有利远景区。

**关键词:** 土壤氡活度浓度; 水中氡活度浓度; 地下热水; 控热断裂构造

**中图分类号:** P631.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0075-04

## Application of Radon Measurement in the Geothermal Water Survey in Jiamusi City

LIU Jing-hua, WANG Zhu-wen, WANG Xiao-li, YI Bing, ZHAO Yu-yao

(School of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

**Abstract:** The integrated methods of radon measurements both in water and soil were used during the geothermal water survey in the region of Jiamusi city, and the disadvantageous factors were overcome effectively in the survey. By normal transformations of the radon concentrations measured in water and soil, and analyzing of original radon concentrations, the indicative function of radon concentration anomalies on the geothermal water control structures is made clear. Through trend analysis of measured radon concentration, extraction of local anomalies and integration of the different anomaly information, the prospective areas of geothermal water of Jiamusi city are determined. The result provides a basis for further detailed geological investigation of geothermal water.

**Key words:** soil radon concentration; water radon concentration; geothermal water; geothermal water controlled fracture structures

## 0 引言

地下热水的形成必须具备一定的地质条件, 如热源体、孔隙良好的储热水层、致密的盖层、断裂构造等。其中断裂构造对于热水的形成尤其重要, 它即起到导水增温的作用, 又使深部热储在地下水动力作用下带至地表<sup>[1]</sup>, 所以地下热水的勘探主要是确定储热断裂构造, 储热断裂构造的勘探成为地下热水勘探的关键。氡气测量在断裂构造勘探中具有独特性, 有许多成功的实例<sup>[1-7]</sup>, 如柿子坪热田<sup>[2]</sup>

上方的氡气异常, 经后期钻探已证实了热田的存在, 说明深源氡随地下水沿构造通道或岩溶缝洞运移模式的正确性。在城市中, 当其他地球物理方法受城市电磁场及震动干扰时, 氡气测量更显其优势。在佳木斯城区开展的地下热水调查, 考虑到城区地理及地质的特殊性, 即较厚的覆盖层、基岩较深、无法进行地质填图; 又有地面建筑及城市基本设施的影响, 所以使用了土壤氡气测量和水中氡气测量方法进行地下热储勘探, 目的是圈定出地下热水的有利远景区。

收稿日期: 2008-04-20

基金项目: 四川省地学校技术重点实验室开放基金项目(27-3); 黑龙江省第六地质勘查院项目(D25); 吉林大学种子基金项目 498042300423)

作者简介: 刘菁华(1963-)女, 江西南昌人, 教授, 理学博士, 从事核地球物理与环境地球物理教学研究。E-mail: jinghua@jlu.edu.cn

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 测区地质概况

佳木斯市是黑龙江省东部的工业重镇，也是全省的交通枢纽之一，区内公路、铁路四通八达，还有水运及航空线，交通十分便利。研究区范围为东经 $130^{\circ}17'47''\sim130^{\circ}25'37''$ 、北纬 $46^{\circ}46'26''\sim46^{\circ}49'37''$ 之间。

1.1 地层及岩性

佳木斯市城区主要坐落于佳木斯残留盆地的北缘，其北侧松花江流域为东北著名的北东向依—舒地堑北端的发育区，其东北与三江盆地最西部的构造单元佳木斯隆起和绥滨断陷相邻。

盆地基底主要由古老的中元古界正长花岗岩和二长花岗岩组成。佳木斯盆地的盖层沉积层主要由早、晚白垩纪陆相粗屑岩沉积地层及第四系所组成，主要地层及岩性见表 1。

表 1 地层及岩性

Tab. 1 Stratum and Lithological Character		
地层		岩性
下白垩统	猴石沟组	灰白色、黄绿色、灰黄色砂岩，含砾砂岩与页层互层，砾岩及凝灰质砂岩、页岩，局部见薄层煤
	西格木组	中性、中基性火山岩、安山岩类
上白垩统	敖其组	中酸性熔岩、火山凝灰岩为主
	四丰台组	陆相粗屑岩组成，以中粗粒砂岩、砾岩、含砾砂岩、粉砂岩等为主
第四系		砂、砾石、亚黏土等组成的河漫滩堆积层

前人研究表明，本区地下热水的主要储集目的层以断裂裂隙带为主。在粗碎屑岩层中，地下热水是可能具有开发价值的资源。

1.2 断裂构造

本区的构造主要类型为断裂构造，而且多数形成于白垩纪末或新近纪时期。区内断裂构造比较发育，不仅有北东向、北西向断裂，也发育了近南北向断裂，但以北东向和北西向为主。从断裂力学性质观测，区内断裂包括张性、压性和扭性断裂。在佳木斯市周边地区的野外露头上发现有褶皱构造，从褶皱构造的展布方向看，以北西向的正常褶皱为主，野外没有发现倒转褶皱。发现的褶皱构造均被多组断裂构造切断和破坏，说明断裂形成时期为晚白垩纪之后、第四系堆积之前。由遥感解译的线性构造有北东向断裂 $F_1\sim F_5$ ，北西向断裂 $F_8、F_9$ ，南北向断裂 $F_{10}$ ，东西向断裂 $F_6$ (图 1)。

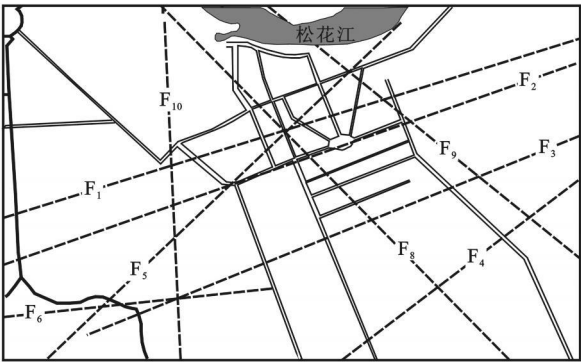


图 1 佳木斯市区构造地质图

Fig. 1 Tectonic Structure Map of Jiamusi Urban Districts

2 方法的地质基础

地下热水资源的形成与地下构造断裂密切相关，构造既是地下热水形成的储存空间，又是热水的循环通道。而断裂构造的存在造成放射性元素氡随地下水沿断裂迁移和富集，形成地表可探测到的放射性氡异常，这就是氡气测量探测地下热水资源的地质基础。这种氡活度浓度异常形成的地质依据是<sup>[2-3]</sup>：

(1)地下热水蒸气往上迁移时，其路途所遇的氡能被蒸气压力推向地表。温度越高，氡溶解于水中的量越少，热水蒸气中含的氡越高。这些含氡热气可沿着裂隙、孔隙和毛细管扩散，并在对流、抽吸等多种因素作用下迁移到地表或近地表。

(2)随着地温梯度从地下向地表的不断减小，铀、钍、氡等放射性元素不断向地表运移，从而在地表引起氡活度浓度异常。

(3)当地下热水中溶解有放射性物质铀和钍时，当其沿构造通道运动而出露地表时，由于地球化学环境的改变以及细粒疏松物质、有机质的吸附等原因，会在构造带附近出现放射性物质的沉淀和富集，从而造成氡及氡子体异常。

(4)岩石破碎、裂隙发育，不仅增大了岩石的射气系数，使得放射性气体容易溢出，而且构造本身是气体的良好通道，较深部的氡气也能沿着断裂带向地表迁移，形成氡活度浓度异常。

所以，氡作为地热资源的指示元素，为通过查找断裂构造而探测地下热水资源提供了手段，同时为通过土壤或浅层地下水中氡活度浓度的富集特征，来探测地下热水的有利远景成为可能，也为氡活度浓度异常解释奠定了基础。

3 测量数据处理与异常分析

3.1 原始数据正态变换

由于氡元素的迁移、富集与地下水的运动及断裂构造密切相关, 所以其数据的分布受局部控制因素作用, 导致数据非正态分布, 这对数据统计处理方法的使用产生影响, 故原始数据的正态化是必需的。由地下水和土壤中氡活度浓度分布直方图(图 2)可看出, 它们明显服从对数正态分布, 故将原始数据进行对数变换, 使非正态数据正态化<sup>[8]</sup>, 经对数变换后, 数据基本服从正态分布, 如图 3, 达到了正态化的目的。

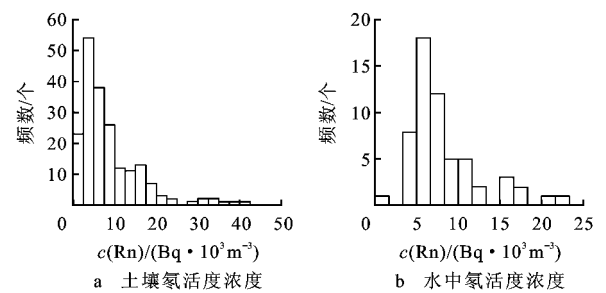


图 2 土壤与水中氡活度浓度分布直方图  
Fig. 2 Histogram of Soil Radon Concentration and Water Radon Concentration

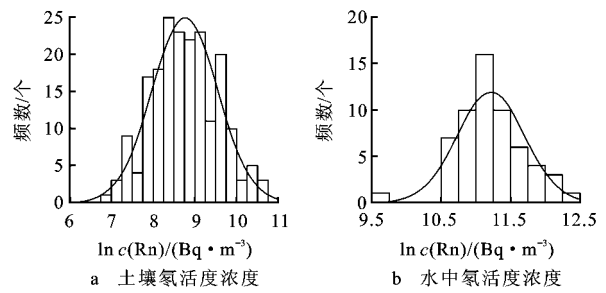


图 3 经对数变换后土壤及水中氡活度浓度分布直方图  
Fig. 3 Histogram of Soil Radon Concentration and Water Radon Concentration After Logarithmic Changing

3.2 水中氡活度浓度与土壤氡活度浓度异常特征

水中氡活度浓度及土壤氡活度浓度数据经对数转换后, 数据分布基本服从正态, 作两者的氡活度浓度等值线图(图 4、5), 对比两图可以发现氡活度浓度异常分布有以下特征:

- (1) 水中氡活度浓度分布范围较大, 其形态以带状和团块状为主, 异常轴呈北东向和北西向展布。
- (2) 土壤氡活度浓度分布以点状成串出现, 异常轴为北东向和北西向。
- (3) 水中和土壤中氡活度浓度异常位置基本

相吻合, 如北东向的水中氡活度浓度异常带与土壤氡活度浓度北东向串状异常位置相符, 水中氡活度浓度在西侧的团状异常与土壤氡活度浓度在西侧的点状成串异常相吻合。

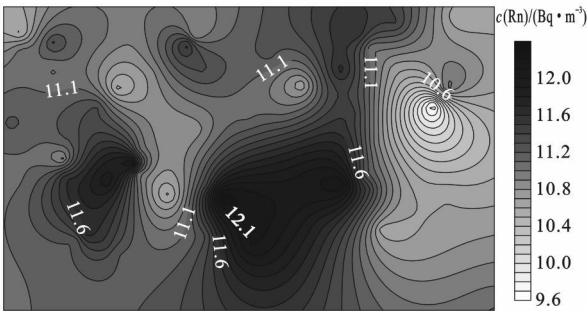


图 4 水中氡活度浓度等值线  
Fig. 4 Contour Map of Water Radon Concentration

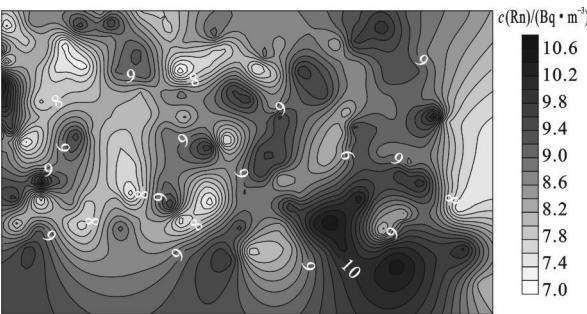


图 5 土壤氡活度浓度等值线  
Fig. 5 Contour Map of Soil Radon Concentration

这些异常特征可解释为水中氡活度浓度异常为反映一定深度受构造控制的氡元素的富集, 所以局部干扰小, 异常多以带状出现; 土壤氡活度浓度异常是氡沿构造迁移后, 在浅表造成的元素富集, 受浅表因素影响较大, 局部信息多, 所以异常多以分散的零星状出现。

水中和土壤中氡活度浓度异常所具有的良好一致性, 也较好地解释无论水中氡还是土壤氡都是地下断裂构造作用后在浅表的反映, 它们对地下水构造指示作用是一致的, 即所存在的氡活度浓度异常都是地下热水存在的一种指示。

3.3 趋势分析提取剩余异常

为了进一步提取局部异常, 对水中氡活度浓度值及土壤氡活度浓度值进行多项式趋势面分析<sup>[7]</sup>, 进行了二维一至五阶趋势面计算, 选择了土壤氡活度浓度二维五阶趋势等值线图和剩余等值线图、水中氡活度浓度趋势等值线图和剩余等值线图(图 6、7), 两者基本反映了氡活度浓度的趋

势变化和剩余变化。从两者的五阶趋势等值图可看出,异常在方向和范围上基本相吻合,北东的异常带具有较高的一致性。从剩余等值线图可以看出,土壤氡活度浓度值异常较多,反映了局部信息较多,尤其是次要构造信息。水中氡活度浓度局部异常范围较大,与趋势值的位置相一致,它反映了深部构造信息。所以结合两剩余异常的分布,将剩余异常的轴线连起来,可大致划出可能的线性构造(图 6、7 中的虚线)。

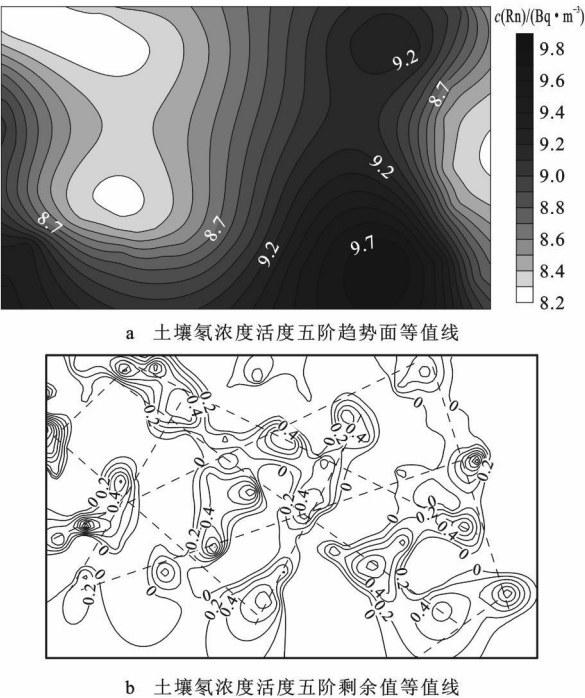


图 6 土壤氡活度浓度五阶趋势值和剩余值  
Fig. 6 Five Order Trend Analysis Predicted Contour Map and Residuals Contour Map of Soil Radon Concentration

4 远景评价

从地下热水氡活度浓度形成机理可知,地表所测氡活度浓度异常是地下储热构造的指示,多个构造的交汇是形成地下热水储存的有利条件,所以在对氡异常进行地下热水储存空间位置解释时,将两个以上构造的交汇作为有利远景区划分的条件之一,多异常重叠是 有利远景区划分的条件之二。

综合原始氡活度浓度异常以及趋势面分析的趋势异常和剩余异常,划分出该区的线性构造线,对比图 1、8 中虚线与遥感解译的线性构造具有较好的吻合。利用以上确定地热储存空间位置的解释原则,对该区进行了远景划分(图 8)。

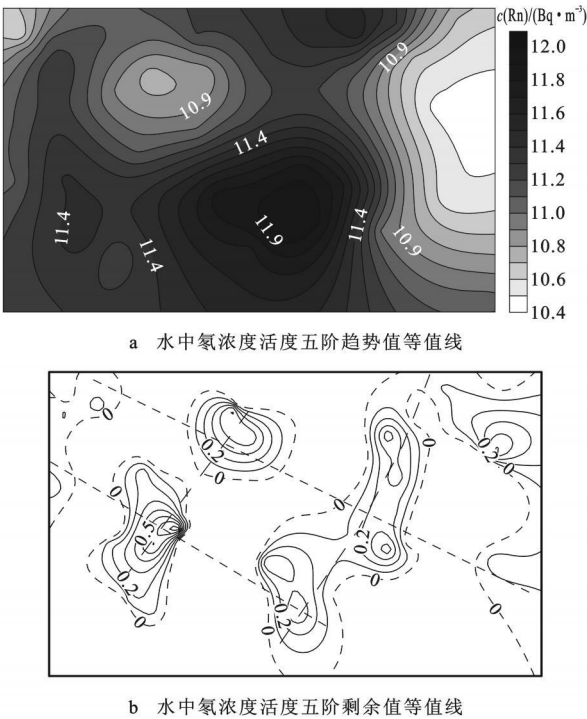
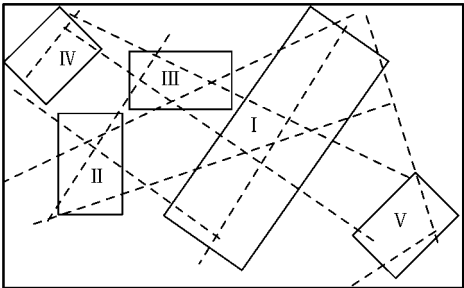


图 7 水中氡活度浓度五阶趋势值和剩余值  
Fig. 7 Five Order Trend Analysis Predicted Contour Map and Residuals Contour Map of Water Radon Concentration



图中方形区域为搞推测有利远景的分类区,虚线为放射性异常中心的轴线,可能断裂构造展布; I — 最有利区; II、III— 次有利区; IV、V— 不太有利区  
图 8 佳木斯地下热水有利远景划分  
Fig. 8 Geothermal Water Favorable Prospecting Areas of Jiamusi Urban Districts

5 结语

由于佳木斯城区特殊的地质背景,运用氡气测量进行佳木斯地下热水调查是一种快捷、经济的可行方法,水中氡活度浓度与土壤氡活度浓度对控热构造具有较好的指示作用,为佳木斯城区地下热水的勘探提供了基础。通过对数据的正态变换,可为数据进行多元统计分析处理提拱了条件。

(下转第 84 页)

### 3 结语

(1)利用空间聚类方法,对所选区域内环境监测指标进行了聚类分析,空间聚类很好的弥补各向异性所造成的影响,避免了以往研究无根据地挑选因子,为数据处理和简化提供了便利。

(2)利用空间聚类后的结果,选取了具有代表性的监测网点以及监测指标  $D_v$ ,利用空间结构信息方向综合变异指标,用以反映所选取的数据中各监测指标的空间变异性,并对结果进行排序,总结出了所选变量 4 个方向上的空间变异程度,并与原始数据的评价结果进行了对比。结果显示,聚类前后的空间结构信息方向综合变异指标  $D_v$  大小差异只是发生了程度极小地改变,但其各个方向上的大小排序却均保持了很好的一致性,这与空间聚类分析的初衷是完全吻合的。

(3)在对监测点位和监测变量进行聚类时,选取的最大聚类数目时是人为规定,未能进行更深层次的细化研究,以后再做类似研究时,可以适当增加聚类数目,以期获得更加准确全面的结果。

(4)针对地下水多变量的空间聚类计算过程较为繁琐,如何利用现有的软件或程序,乃至开发新

的程序,实现算法的简化,对研究具有极其重要的影响。

(5)在本文的空间聚类的研究结果中,只得出了各监测指标在  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  4 个方向上的聚类树状图,能否将之形成空间综合聚类,值得进一步研究和探讨。

#### 参考文献:

- [1] 吕连宏, 张征, 池志森, 等. 地质统计学在环境科学领域的应用进展[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 101-105.
- [2] 陈明. 区域化变量的空间聚类分析[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(2): 222-228.
- [3] 戴晓燕, 过仲阳, 李勤奋, 等. 空间聚类的研究现状及其应用[J]. 上海地质, 2003(4): 41-46.
- [4] 李翔, 潘瑜春, 赵春江, 等. 基于空间连续性聚类算法的精准农业管理分区研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 78-82.
- [5] 张征, 沈珍瑶, 韩海荣, 等. 环境评价学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 朱益玲, 刘洪斌, 江希流. 江津市紫色土中 N、P 养分元素区域空间变异性研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 138-143.
- [7] 张征, 解明曙, 王毅力, 等. 环境模拟与评价中多变量空间结构模型及应用[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(5): 59-63.
- [8] 姚永慧, 潘志强, 孙英君, 等. ArcGIS 地统计分析实用指南[M]. 北京: ArcInfo 中国技术咨询与培训中心, 2002.

(上接第 78 页)

使用趋势面分析提取局部异常,突出氡活度浓度的富集部位,为确定地下热水的有利远景区提供了手段。通过以上工作,可以得到以下几点结论:

(1)无论是水中氡活度浓度还是土壤氡活度浓度原始数据都不服从正态分布,反映了某一因素引起了氡元素的富集,即构造是氡富集和迁移的主要因素。采用对数转换可将氡活度浓度分布正态化,为数据进一步统计处理打下基础。

(2)氡元素具有断裂构造的指示作用,无论是水中氡还是土壤氡对断裂构造具有不同程度的反映,水中氡活度浓度的富集范围大,受局部影响小,土壤氡活度浓度的富集以串珠状异常形式出现,信息量多,受地表干扰也较大。两者在同一地区具有较好的一致性。

(3)进行土壤氡活度浓度和水中氡活度浓度的趋势面分析,使反映深部和浅部的异常更清晰,异常的一致性反映更明确,对于局部异常的解释可进行地下热水有利远景区的划分,所划分出的有利远景区与遥感确定的线性构造的交汇位置基本吻合。

所以氡活度浓度测量对于有利远景区的区划,具有较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] 贾文懿, 章晔, 李淑仪. 核地球物理勘查方法应用实例选编[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [2] 胡耀飞, 李晓, 贾疏源. 峨眉山柿子坪热田地表氡气异常特征[J]. 矿物岩石, 1999, 19(2): 77-80.
- [3] 程业勋, 王南萍, 侯胜利. 核辐射场与放射性勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [4] 薛忍霞. 静电  $\alpha$  核法及其在地热勘探中的应用[J]. 勘察科学技术, 1997(5): 56-58.
- [5] 刘菁华, 王祝文, 王晓丽, 等. 放射性测量在佳木斯城区地下水勘探中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(5): 892-898.
- [6] 袁晓庆. 核技术找水在九龙潭地段的应用[J]. 华东地质学院学报, 1996, 19(4): 405-411.
- [7] 孙二虎, 陈爱珍, 刘鸿福, 等. 测氡法-磁法在祁县王村地热勘探中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2004, 34(3): 307-310.
- [8] 张锦由, 黎春华. 铀矿物化探数据处理方法[M]. 修订版. 北京: 原子能出版社, 2001.