

doi: 10.7690/bgzd.2014.08.013

基于 D-S 证据理论的浅层地下水预测

郭杰¹, 刘建永¹, 王怀晓¹, 张有亮², 王凤山¹

(1. 解放军理工大学野战工程学院, 南京 210007; 2. 解放军理工大学指挥信息系统学院, 南京 210007)

摘要: 针对地下水探测手段综合运用程度低的问题, 对基于 D-S 证据理论的浅层地下水预测方法进行研究。分析已有水文地质资料和遥感资料, 运用三维激光扫描技术、探地雷达技术和高密度电法 3 种浅层高分辨率探测技术, 结合现地水文地质调查对浅层地下水进行综合侦察, 并以证据理论为支撑, 提出基于多层证据组合递推的浅层地下水综合侦察模式和基于多源信息融合的浅层地下水综合预测方法。结果表明: 该方法能解决单一勘测手段的不足, 实现多种侦察手段的优势互补与融合运用。

关键词: 浅层地下水; 信息融合; D-S 证据理论; 预测

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Prediction of Shallow Groundwater Based on D-S Evidence Theory

Guo Jie¹, Liu Jianyong¹, Wang Huaixiao¹, Zhang Youliang², Wang Fengshan¹

(1. College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China;

2. College of Command Information Systems, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Aiming at low levels of integrated use of groundwater detection means, research the prediction of shallow groundwater based on D-S evidence theory. Existing hydro geologic data and remote sensing data are analyzed. The technology based on hydro geological data and remote sensing data, the integrated use of 3D laser scanning technology is applied. Combining ground penetrating radar technology, high-density electrical method in three shallow high resolution detection technology together to realize groundwater prediction. Results show that the method can solve the lack of a single survey means to realize the advantages of a variety of complementary means of reconnaissance and integration use.

Keywords: shallow groundwater; information fusion; D-S evidence theory; prediction

0 引言

地下水具有水质澄清、水质稳定、分布面广和资源量丰富等优点, 而且便于防护伪装、受地域限制少。浅层地下水是指和地表有一定的水力联系, 埋藏深度小于 50 m 的地下水。相对于中深层地下水而言, 浅层地下水具有 2 大优势: 1) 浅层地下水与地形地貌、地表水文植被等关系更密切, 可以根据这些地表表征现象, 在广区域、大范围内快速、概略获取其分布信息, 进而进行局部精确侦察; 2) 浅层地下水赋存较浅, 易于汲取, 满足部队快速机动、遂行保障的要求, 且便于伪装、隐蔽和防护。因此, 浅层地下水是未来战场给水保障的重中之重。

近些年, 许多学者和科研人员, 利用遥感、核磁共振和探地雷达等新技术对地下水探测领域做了大量研究^[1-4]。这些不同的技术手段、不同的侦察设备, 分别从不同的角度获取地下水的各种特征参数, 进而预测地下水情况, 各有其优缺点与适用性。如何集各技术手段和设备之所长, 实现多种技术手段耦合, 利用信息综合处理与优化决策技术, 发挥多源信息互补优势, 提高地下水侦察的快速性与预测

的准确性, 是迫切需要研究的一个问题。

信息融合技术模拟人的大脑, 可以融合来自不同传感器、不同时间、不同类型的信息, 发挥多源信息互补优势, 以提高决策的准确性。证据理论作为一种信息融合方法, 对模糊和不确定信息的融合具有独特优势, 用来解决具有很强不确定性的浅层地下水预测, 符合事物的客观特征。

证据理论由 Dempster 于 1967 年提出^[5], 后由他的学生 Shafer 对其进行推广和完善^[6], 故又称为 Dempster-Shafer 理论(简称“D-S 证据理论”)。证据理论是一种不确定性推理方法, 利用多个对问题的不精确判断和描述, 通过一定的方法对这些判断和描述中的一致性信息进行聚焦, 对矛盾信息进行排除和整合, 得到不精确结论的方法^[7]。利用证据理论能够很好地解决具有不确定性的多源信息融合问题。基于此, 笔者对基于 D-S 证据理论的浅层地下水预测方法进行研究。

1 D-S 证据理论

在 D-S 证据理论融合算法中, 识别框架是整个

收稿日期: 2014-03-15; 修回日期: 2014-04-11

基金项目: 解放军理工大学校预研基金资助(2013023); 解放军理工大学军事理论研究基金资助(2013017); 国家自然科学基金(51308541); 江苏省自然科学基金(BK20130066)

作者简介: 郭杰(1982—), 男, 安徽人, 博士, 从事战场环境数字化研究。

判断的框架，基本概率分配是融合的基础，合成规则是融合过程，而信任函数和似然函数用来表达融合结论对某个假设的支持力度区间上下限。

1.1 识别框架

证据理论首先引入了识别框架的概念，它是由一组相互独立的、可穷举的元素构成的集合。

定义 1 设有一个判决问题，设大家所能认识到的结果用集合 Θ 表示，那么，大家所关心的任一命题都对应于 Θ 的一个子集，Shafer 称 Θ 为识别框架。 Θ 的子集称为一个命题， Θ 的幂集 2^Θ 表示了所有可能的命题集。

1.2 基本函数

在识别框架的基础上，证据理论定义了基本概率分配函数、信任函数和似然函数。

定义 2 设 Θ 为识别框架，集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ (2^Θ 为 Θ 的幂集) 满足：

- 1) $m(\emptyset) = 0$ ， \emptyset 为空集；
- 2) $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1, \forall A \subseteq \Theta$ 。

则称 m 为 Θ 上的基本概率分配函数 (basic probability assignment function, BPAF)，简记为基本概率分配 (BPA)。其中， A 被称为命题， $m(A)$ 称为命题空间 A 的基本可信数或者基本概率赋值，表示证据支持 A 发生的程度，如果 $m(A) > 0$ ，则称 A 为证据的焦点，所有焦点的集合构成了证据的核心。

1.3 Dempster 合成法则

证据理论提供了 1 个能够组合多条证据的合成法则——Dempster 合成法则，可以组合来自不同证据源的证据，反映多个证据的联合作用，为多源信息的融合提供一种有效的手段，也是证据理论研究的核心内容。

1) 2 个证据的合成法则。

定理 1 设 Θ 为识别框架， A 和 B 为 2 个独立的证据源， m_1 和 m_2 是其对应的基本概率分配 (BPA)，焦点集合分别为 $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 和 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 。 m_1 和 m_2 的合成记为 $m_1 \oplus m_2$ 。 $m_1 \oplus m_2$ 的焦点记为 $C(C \subseteq \Theta)$ ，函数 $m_1 \oplus m_2: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 是基本概率分配，设

$$\sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1 \quad (1)$$

那么，这 2 个基本概率分配的合成公式为

$$[m_1 \oplus m_2](C) = \begin{cases} 0 & C = \emptyset \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - k} & C \neq \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

其中， $k = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j)$ 称为证据冲突因子，

反映了 2 个证据之间的冲突程度。 k 值越大，说明这 2 批证据间的冲突程度也越大；反之， k 值越小，说明这 2 批证据间的冲突程度也越小。

系数 $K = \frac{1}{1-k}$ 称为归一化因子，表示将冲突证据产生的信度按比例分配到合成后的每一个焦点上，以满足对空集不产生任何信度，同时又满足对合成后所有焦点的总信度为 1 的要求。归一化因子 K 是冲突因子 k 的递增函数；因此，也可用来表示 2 个证据间的冲突程度。

2) 多个证据的合成法则。

定理 2 设 Θ 为识别框架， S_1, S_2, \dots, S_n 为 N 个独立的证据源， m_1, m_2, \dots, m_n 是其对应的基本概率分配 (BPA)， m_1, m_2, \dots, m_n 对应的焦点分别为 A_1, A_2, \dots, A_n ，如果 m_1, m_2, \dots, m_n 是可合成的，焦点记为 $A(A \subseteq \Theta)$ ，函数 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ ， $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 是对应的基本概率分配，那么这 N 个证据的合成公式为

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \emptyset \\ \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1)m_2(A_2) \dots m_n(A_n)}{1 - k} & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$k = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1)m_2(A_2) \dots m_n(A_n) \quad (4)$$

2 浅层地下水综合探测方法

水源探测是指以水文地质理论为指导，利用各种水源侦察器材和技术手段，获取给水条件信息，并对给水条件信息进行及时处理、分析和判断的行为，为水源开辟和给水站的构筑提供决策依据的侦察行动^[8]。伴随着科技的发展，逐渐发展形成了地质、水文地质与物探 3 种地下水探测方法^[9]。

三维激光扫描技术作为近些年发展起来的一种新技术，采用立体式、全方位的扫描方式，能够快速获取地表高精度的位置信息和影像信息，可以精确表达地形地貌的变化，提取与浅层地下水密切相关的地形、地貌、水系和植被等特征因子，进而预测地下水赋存情况，且已在军事地形侦察中得到成功应用，研究基于三维激光扫描技术的浅层地下水侦察方法，可以弥补现有技术的不足。

运用三维激光扫描、地质雷达和高密度电法这 3 种方法，作为浅层地下水综合侦察的技术手段。

运用证据理论方法, 将不同来源、不同类型的信息均抽象为证据, 基于证据组合规则, 构建了基于多层证据组合递推的浅层地下水综合侦察模式, 阐述了其原理, 给出了具体的流程和方法。该方法由“区域→地段→线→点”逐层逼近, 每一步获得的证据逐层叠加, 使地下水信息越来越清晰, 证据越来越充分, 最后缩小到一个“点”上, 从而确定凿井位置及水位埋深。

根据各种技术手段的特点, 可将整个侦察过程分为 4 步, 如图 1 所示。

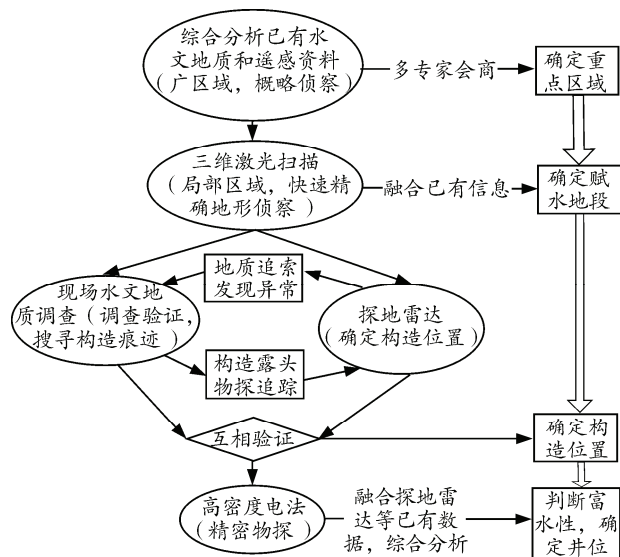


图 1 浅层地下水综合探测过程

第 1 步: 广区域, 概略侦察, 确定赋水区域。综合分析已有水文地质资料和解译后的遥感资料, 确定赋水条件最好的区域。

第 2 步: 局部区域, 快速侦察, 确定赋水地段。采用三维激光扫描技术对第 1 步侦察确定的局部区域, 实施重点侦察, 获取高精度的地表点云和影像信息, 通过处理生成高分辨率 DEM 数据和植被、水系分布数据, 融合已有的数据, 确定赋水地段。

第 3 步: 赋水地段, 物探和现场调查组合侦察, 确定构造位置。对第 2 步确定的赋水地段, 进行水文地质调查, 搜寻泉水露头、构造痕迹或其他具有赋水特征的地段, 采用地质雷达对上述地段进行重点侦察, 2 种方法相互印证, 确定构造位置。

第 4 步: 构造位置, 精密物探, 判断富水性, 确定井位。对第 3 步确定的构造位置, 利用高密度电法进行精密物探, 结合第 3 步探地雷达数据, 对构造富水性进行精密判定, 并确定井位。

3 D-S 证据理论在地下水预测中的应用

地下水埋藏于地表以下, 看不见、摸不着, 分

布受地形、地质和水文等诸多因素影响, 如何快速、精确实施地下水源勘测一直是一个热点问题^[10]。不同的地下水探测手段从不同的角度获取影响地下水分布的各种特征参数, 各有其优缺点与适用性。基于证据理论的多源信息融合方法能够将不同类型、不同结构的水源侦察信息抽象化为证据, 进而综合各方面的信息进行综合决策, 以提高地下水源预测的科学性。不同的地下水探测手段可看作不同的传感器, 地下水综合侦察就是多个不同传感器的集成运用, 其核心是多源信息的融合处理问题。

综合侦察的最终目标是判断侦察区域内有无浅层地下水, 构造识别框架 $\Theta = \{\text{有浅层地下水, 无浅层地下水}\}$ 。设已有水文地质数据为 A 集(包括构造地质和水文地质信息)、已有遥感影像数据为 B 集、三维激光扫描数据为 C 集、现场调查数据为 D 集、地质雷达数据为 E 集、高密度电法数据为 F 集。用 $m_A, m_B, m_C, m_D, m_E, m_F$ 分别表示基于对应信息集所获得的识别框架 Θ 的基本概率分配。每一步侦察在实现局部目标的同时, 也均为最终目标提供一定的信息支持。

假设将侦察地域划分为 $m(m \geq 1, \text{且有限})$ 块, $u_j (1 \leq j \leq m)$ 表示第 j 块地域, 则 $\forall i \neq j, u_i$ 与 u_j 满足相互独立不相容条件, 因此可定义识别框架 $\Theta_1 = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。因此, 确定富水性最好的区域就转化为识别框架 Θ_1 下的证据组合问题。

假设请 $n (n \geq 3)$ 个专家根据已有 A 集数据, 对划定的每个区域富水程度进行评估, 设 $a_{ij} (0 \leq a_{ij} \leq 1)$ 表示第 i 个专家对第 j 块区域的浅层地下水评价情况, 0 表示肯定无水, 1 表示肯定有水。通常, 浅层地下水评估作为不确定性问题, 取值都在 $0 \sim 1$ 之间, 取值越大, 代表该区域有水的可能性越大。

这 n 个专家对 m 块地域的富水性评价矩阵为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

采用证据理论综合这 n 个专家的意见, 怎样从 m 块区域中选择富水性最好的区域?

$$\text{定义 } \text{mass}_i(A) = \begin{cases} 0, & A \neq \{u_j | 1 \leq j \leq m\} \\ \frac{a_{ij}}{\sum_{A \in \Theta} a_{ij}}, & A = \{u_j | 1 \leq j \leq m\} \end{cases} \text{ 表示}$$

第 i 位专家在识别框架 Θ_1 上的基本概率分配。

则 $mass(A) = mass_1(A) \oplus mass_2(A) \oplus \dots \oplus mass_n(A)$, 表示 n 个专家根据 A 集数据对整个区域富水性评价意见的综合。

对于 $mass(B)$, B 集遥感数据对识别框架 Θ_1 上的证据, 可在定量分析的基础上得到, 亦可像 $mass(A)$ 一样, 综合多名专家的意见得到。

则 $mass_{AB} = mass_A \oplus mass_B = mass(A) \oplus mass(B)$, 表示综合 A 集数据和 B 集数据对整个区域富水性的判断。

假设 $mass_{AB} = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, $a_i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 块区域富水性为最好的概率, a_i 的排序即对应区域 u_i 富水性为最好的排序。

则可根据 $a_k = \max \{a_i | i=1, 2, \dots, m\}$, 确定 u_k 为富水性最好的区域。

同时, 可根据 n 个专家对 u_k 区域的评价 $(a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk})$, 得到 A 集数据在识别框架 Θ 上的基本概率分配 m_A 。同理可得到其他数据集在识别框架 Θ 上的基本概率分配。随着侦察工作的深入, 获取的信息越来越丰富, 识别框架 Θ 上的证据越来越充分, 可形成如图 2 所示的多层证据组合递推的浅层地下水预测结构。

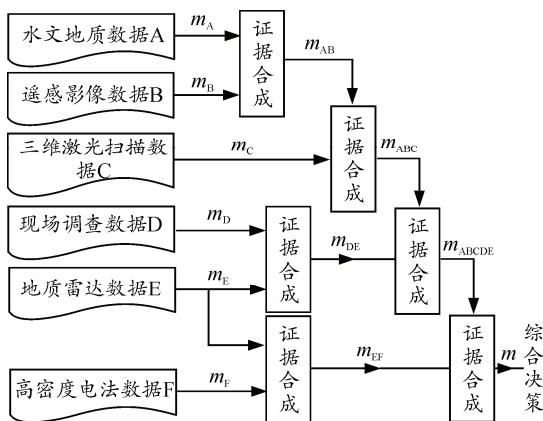


图 2 证据组合的递推结构模型

图 2 只是说明在浅层地下水综合侦察中, 可以将每一步获取的信息转化为对最终目标判决的证据, 从而实现数据的有效融合。每一步的侦察信息均为最终的判决提供了一定的证据支持, 随着侦察工作的推进, 信息不断丰富, 证据逐层叠加, 预测结果的可靠性逐步提高。

4 实例及其分析

假设基于三维激光扫描、地质雷达和高密度电

法对某地进行地下水探测, 对当地的水文地质数据 A、遥感影像数据 B、三维激光扫描数据 C、现场调查数据 D、地质雷达数据 E 和高密度电法数据 F 进行分析处理, 所得结果如表 1 所示。

表 1 各种探测手段的原始数据

水源状态	A	B	C	D	E	F
有浅层地下水(S ₁)	0.30	0.76	0.39	0.66	0.53	0.53
无浅层地下水(S ₂)	0.55	0.18	0.38	0.16	0.34	0.26
不确定(S)	0.15	0.06	0.23	0.18	0.13	0.21

由表 1 数据, 根据式 (4) 计算, 可得到 A 类和 B 类证据的冲突因子 $K_1=0.472$ 。则证据 A 与 B 融合后的基本概率赋值为 $m_{AB}(S_1)=(0.3 \times 0.82+0.15 \times 0.76)/(1-0.472)=0.6818$, $m_{AB}(S_2)=0.3011$, $m_{AB}(S)=0.0171$ 。其他证据融合后的概率赋值同理可得, 结果见表 2。由此可得, 单种探测手段不能明确判断目标所处状态, 由融合结果可知, 随着多个证据的融合, 对状态判断的不确定性逐渐下降, S₁ 状态的基本概率赋值也凸显出来, 可以明确判断出目标处于有浅层地下水状态。

表 2 6 种证据合成后的基本概率赋值

水源状态	m_{AB}	m_{ABC}	m_{ABCD}	m_{ABCDE}	m_{ABCDEF}
有浅层地下水(S ₁)	0.681 8	0.687 7	0.845 8	0.885 3	0.924 0
无浅层地下水(S ₂)	0.301 1	0.305 0	0.152 3	0.114 3	0.075 9
不确定(S)	0.017 1	0.007 3	0.001 9	0.000 4	0.000 1

5 结束语

笔者提出的地下水侦察方法综合运用了多种技术手段, 获取与地下水相关的多种原始测量数据。基于 D-S 证据理论的地下水预测根据一定的准则, 结合专家的先验知识, 将原始信息或经处理后的信息转化为对最终判决或其某一环节的证据, 运用证据理论方法, 将所获得的证据合成, 进而根据合成的结果, 更科学、更准确地预测了地下水的分布情况。文中的方法综合了各种信息, 结果更加明确、可信。这种方法为浅层地下水探测研究提供了又一技术手段, 由于其科学、准确, 对工程实践有现实意义。

参考文献:

[1] Timothy B Minor, Jerome A Carter, Matthew M Chestey, et al. The Use of GIS and Remote Sensing in Groundwater Exploration for Developing Countries[C]// Environmental Research Institute of Michigarn. Proceedings of Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, San Antonio, Texas: APPROVED FOR PUBLIC RELEASE, 1994: 134-142.

[2] 王飞跃, 孙顺新. 环境遥感信息分析法在干旱区找水中的应用:以内蒙锡林浩特地区为例[J]. 国土资源遥感, 1999, 39(1): 36-42.