

模糊因子分析在地下水污染评估中的应用 ——以河南省洛阳市为例

马荣, 石建省

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050803

摘要: 传统的多元统计法难以定量化表征不同污染源对单个样本点的影响, 本文引入了一种新的方法——模糊因子分析法。将该方法应用于洛阳市地下水污染来源解析研究, 通过模糊聚类和因子分析对研究区样品进行分类, 探明主要的污染源类型及其对整个研究区和单个样品点的污染贡献率。计算结果表明: 洛阳市浅层地下水主要有以下四个污染源: 基岩风化、加工制造业、人类活动、能源企业/古遗迹, 其对整个研究区的污染贡献率分别为基岩风化 5.831%、加工制造业 14.324%、人类活动 20.291%、能源企业/古遗迹 4.392%。通过模糊聚类中的隶属度函数的概念, 亦可求得上述四个污染源对于区内各采样点的污染贡献率。故对整个洛阳市而言, 减少生活污水的排放和化肥的使用, 对加工制造业中的三废污染物进行无害处理, 是治理其地下水污染的主要途径; 对于每个单独的样本点, 则要根据其主要的污染来源, 提供不同的污染防治措施。模糊因子分析法可以为地下水污染评估与防治提供更加科学、合理的决策依据。

关键词: 隶属度; 因子分析; 地下水; 污染; 洛阳

中图分类号: P641; O29; P641.8 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2011.05.11

Assessing Groundwater Pollution Using Fuzzy Factor Analysis Method: A Case Study of Luoyang City in Henan Province

MA Rong, SHI Jian-sheng

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050803

Abstract: It is difficult for traditional methods to characterize quantitatively pollution contribution rate of different pollution sources to single sample point. Fuzzy factor analysis methods, fuzzy ISODATA cluster analysis (FICA) and factor analysis (FA) were utilized to assess the factors responsible for the hydrochemical composition of the groundwater. The new methods were employed in Luoyang City, where twenty-eight hydrochemical variables were considered in 241 samples collected. Four pollution sources were identified, i.e., anthropogenic activities, processing manufacturing industries, bedrock weathering, and energy enterprise/ancient vestige. The relative pollution contribution rates of the four pollution sources are 20.291% for anthropogenic activities emission, 14.324% for processing manufacturing industry emission, 5.831% for bedrock weathering source, and 4.392% for energy enterprise/ancient vestige source. Meanwhile, the pollution contribution rates of pollution sources to each sample point were also calculated. In regard to the groundwater pollution prevention of Luoyang City, the reduction of the domestic sewage emission and chemical fertilizer consumption and the relocation of industries with heavy pollution seem to be effective ways to control groundwater pollution; as for the sample point, concrete pollution prevention measures should be provided for different sample points according to their primary pollution sources. The fuzzy factor analysis method is proved to be a practical, simple and useful tool to assess and

本文由国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2010CB428800)资助。

收稿日期: 2011-06-14; 改回日期: 2011-06-30。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 马荣, 男, 1982年生。博士生。主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: margroundwater@gmail.com。

通讯作者: 石建省, 男, 1962年生。研究员, 博士生导师。主要从事水文地质评价研究。E-mail: tiger7886@263.net。

prevent groundwater pollution.
Key words: membership; factor analysis; groundwater; pollution; Luoyang

近年来,由于工农业的迅猛发展,地下水水质不断恶化,挖掘对地下水污染起控制作用的关键因子,对其污染防治有着至关重要的作用。研究表明(Wang et al., 2011a; Soh et al., 2007; Sajn, 2006),多元统计法能够对地下水化学变量进行有效分析,尤其是研究区内有大量污染样品时,多元统计法能准确查明地下水污染来源,提供科学的防治措施。如Yidana et al.(2008)利用多元统计分析研究阿夫拉姆平原硅酸盐风化物对地下水化学的影响,在此基础上,其又利用地下水化学变量与多元统计法对该地区地下水水质进行了评估(Yidana et al., 2010); Dhage et al.(2006)则利用此方法对孟买海岸地下水非点源污染物来源进行了研究;韩菲等(2009)通过多元统计分析对辽河水中 PHAs 的污染水平及来源进行解析。虽然多元统计法取得了良好的计算结果,但是其只限于研究单个污染源对研究区与样品点的污染贡献,而忽视了在实际情况下,大多数样品点都会受到不同污染源的影响。因此,需要研究人员能够定量化表征不同污染源对任意采样点的污染贡献,从而有针对性的为其提供防治措施,为此引入模糊因子分析法来解决这一难题。

模糊因子分析法的核心思路是:利用模糊聚类分析来代替传统多元统计法中的层次聚类分析,对研究区内的污染样品进行模糊分类,并计算出单个样品点对于各个分类的隶属度。在此基础上结合因子分析法与实际的地下水污染源化学成分组合,对研究区内的污染来源进行识别,并计算出不同的污染源对于整个研究区及单个样本点的污染贡献率,从而为地下水污染防治提供决策依据。

1 研究方法

模糊聚类法是依据客观事物间的特征、亲疏程度和相似性,通过建立模糊相似关系对客观事物进行分类的一种手段(Adabanija et al., 2008)。其核心思想是:使得被划分到同一簇的对象之间相似度最大,而不同簇之间的相似度最小。即每一数据点属于某一聚类是以特殊的隶属等级给出的,它提供了一种将多维空间的数据点映射到不同聚类集的方法。该分类算法的出发点是基于对目标函数的优化,通过对平方误差函数求最优值,来寻找中心矢量,以使各类中的样本到聚类中的加权距离平方和达到最小,其目标函数常取如下形式(Wang et al., 2011b):

$$\min J_m(U,V)=\sum_{j=1}^n\sum_{i=1}^cu_{ij}^md_{ij}^2 \tag{1}$$

其约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^cu_{ij}=1 \\ u_{ij}\geq 1 \\ 1\leq i\leq c \\ 1\leq j\leq c \end{cases} \tag{2}$$

式中: n 为总的样本个数; c 为聚类中心数; U 为 $n\times c$ 阶的隶属函数矩阵; u_{ij} 为隶属度; V 为聚类中心矩阵; d_{ij} 为第 j 组数据对于第 i 类聚类中心的欧拉距离; m 为模糊指数。该算法的主要计算步骤(Bezdek, 1981)如下: 1. 选择一个常数 $\varepsilon=0.01$, 设置迭代次数 $k=0$, 随机给出聚类中心矩阵 V ; 2. 计算 U^k , 如果

$$d_{ij}^k>0, \text{ 则 } u_{ij}^k=\frac{1}{\sum_{r=1}^c[(\frac{d_{ij}^k}{d_{ri}^k})^{\frac{2}{m-1}}]}, \text{ 若存在 } r \text{ 和 } j \text{ 使得 } d_{rj}^k=0, \text{ 且 } r=i, \text{ 则 } u_{ij}^k=1; \text{ 3. 计算 } V_i^{k+1}=\frac{\sum_{j=1}^nu_{ij}^{(k)m}x_j}{\sum_{j=1}^nu_{ij}^{(k)m}x_j},$$

如果 $\|V^{(k)}-V^{(K+1)}\|\leq\varepsilon$, 停止, 否则, 令 $k=k+1$, 返回步骤 2 继续计算。

本文将基于模糊等价关系的硬分类和基于模糊划分的软分类有机结合, 形成适用于地下水污染研究的模糊聚类识别复合模型。通过模糊聚类法得到地下水污染最佳分类及各个样品点对于分类的隶属度(Shen et al., 2007)。

因子分析的原理是基于承认与污染源有关的化学变量间存在着某种相关性, 在不损失主要信息的前提下, 将一些具有复杂关系的变量或样品归结为数量较少的几个公因子(Wu et al., 2009)。其主要目的是求出公因子数的载荷系数 n , 该系数表明了变量与因子之间的相关性, 载荷值越大, 表明该变量对因子的贡献越大。因子分析的数学模型(钟文丽等, 2006)为:

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11}F_1+a_{12}F_2+\cdots+a_{1p}F_p+\varepsilon_1 \\ x_2 &= a_{21}F_1+a_{22}F_2+\cdots+a_{2p}F_p+\varepsilon_2 \\ &\cdots \\ x_p &= a_{p1}F_1+a_{p2}F_2+\cdots+a_{pp}F_p+\varepsilon_p \end{aligned} \tag{3}$$

式中: x 为变量; $a_{ij}(i=1, 2, \cdots, p; j=1, 2, \cdots, p)$ 为具体的系数值, 即因子载荷; $F_1, F_2, F_3\cdots$ 为公共因子。

公共因子 $F_1, F_2, F_3 \dots$ 也可以表示为:

$$\begin{cases} F_1 = b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + \dots + b_{1p}x_p \\ F_2 = b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + \dots + b_{2p}x_p \\ \dots \\ F_m = b_{m1}x_1 + b_{m2}x_2 + \dots + b_{mp}x_p \end{cases} \quad (4)$$

其中, b_{mp} 为主因子得分的系数; x_p 为标准化后的指标; p 为指标数; m 为主因子个数。根据各主因子的得分, 其综合值为:

$$V = (F_1 \times C_1 + F_2 \times C_2 + \dots + F_m \times C_m) / C \quad (5)$$

其中, C 为主因子的累计方差; C_i 为各主因子的方差百分数。

在地下水污染物来源分析研究中, 通常采集大量(设为 n 个)样品, 从每一样品中分析出若干种(设为 s)化学成分的浓度, 这样就构成了一个包含 $n \times s$ 个数据的集合。由于同一环境样品的组成成分并不相互独立, 来自于同一类污染源的化学成分间存在较强的相关性, 因此可以用 P 个因子($P < s$)来描述原来的样品集合。应用因子分析对样品的地下水化学变量进行计算, 再与模糊分类结果相结合进行分析, 可获得主要污染源化学特征及其贡献率。

2 实例分析

2.1 研究区概况

洛阳市位于河南省西部, 是豫西重要的工业城市, 辖偃师市、伊川县、洛宁县、栾川县、汝阳县、涧西区、西工区等一市九县六区, 总面积 1.52 万 km^2 。洛阳市地下水潜水含水层是生产生活用水的主要开采层, 水位埋深比较浅, 其补给项主要来源于河渠入渗和大气降水补给, 年综合补给量达到 2.524 亿 m^3 , 其中来自洛河、涧河、伊河等地表水补给量达 1.561 亿 m^3 , 占地下水总补给量的 62%, 尤其是洛河的补给量达 1.14 亿 m^3 , 占地下水总补给量的 45%(郭友琴等, 2006); 其排泄项主要有: 1、开采排泄, 农业灌溉、工业和城镇居民生活用水多以开采浅层地下水为主, 尤其是沿河两岸分布的大型集中供水水源地, 主要以开采潜水含水层为主, 因此开采排泄是区内地下水排泄主要方式; 2、蒸发排泄, 在伊洛河漫滩区及一级阶地前缘, 包气带岩性以粉土及砂砾石层为主, 潜水位埋深小于地下水蒸发临界深度, 因此在漫滩区存在严重的蒸发排泄(杜晓舜等, 2003); 3、河流排泄, 在伊洛河局部地段, 河岸两侧浅层地下水位高于河水位, 河流排泄地下水。尤其是在丰水期, 可明显见到岸边有清水流出, 岸边水质较清, 而河中间水质浑浊。由此可见,

地表水质的好坏、水量的多少, 都将给地下水水质带来严重影响(温国明等, 2007)。

2.2 样品采集与测试

研究区共采集浅层地下水样品 241 组(见图 1), 检测 28 项地下水化学变量(Mn、Fe、Cu、Zn、Ba、K、Ni、Be、Co、Cd、Pb、As、Hg、Se、 NO_3^- 、F、Mo、Cl、COD、 NO_2^- 、CN、Cr、 PO_4^{3-} 、I、TH、TDS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、pH)。所有的样品测试均由中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试中心完成, 本次研究中样品的采集与测试是进行分析研究的关键, 根据研究区的实际情况, 依据“地下水污染调查评价规范”和美国环境保护局的“地下水水样采集要求”制定了污染物分析水样的采集、保存和送检技术要求。其中 EH、T、pH 值均是在现场测试完成, 原水样均用 2.5 L 聚乙烯塑料瓶装样, 体积达到容器的 99%, 不加保护剂。为保证最终检测结果的准确性与有效性, 在所有的采样点每次均取两个样品进行测试研究。

2.3 测试结果统计特征

忽视样本数据中的异常值是十分危险的, 对解析结果带来不良影响。重视异常值的出现, 分析其产生的原因, 常常成为发现问题进而改进决策的契机。识别样本数据中异常值的传统方法是基于正态分布 3σ 法则或 z 分数方法, 这两种方法均是以假定数据服从正态分布为前提, 它们对异常值的判断



图 1 研究区及采样分布图

Fig. 1 Study area and sampling locations

标准是以计算数据批的均值和标准差为基础的,而均值和标准差的耐抗性极小,异常值本身会对它们产生较大影响,这样产生的异常值个数不会多于总数 0.7%。但由于在实际应用中,地下水化学变量实测数据往往并不严格服从正态分布,因此,将这种方法应用于非正态分布数据中异常值的判定,其有效性是有限的(Razo et al., 2004)。众多经验表明:箱须图的绘制依靠实际数据,不需要事先假定数据服从特定的分布形式,没有对数据作任何限制性要求,它只是真实直观地表现数据形状的本来面貌;另一方面,箱须图判断异常值的标准是以四分位数和四分位距为基础,四分位数具有一定的耐抗性,多达 25% 的数据可以变得任意远而不会很大地扰动四分位数,所以异常值不能对这个标准施加影响(王淑红等, 2009)。由此可见,箱须图在识别异常值方面具有其它方法无可比拟的优越性。为此,在本次研究中引入了箱须图来识别样本数据中的异常值(见图 2)。

图 2 中, Fe、Mn、Cu、Ni、Cr、Hg 元素的极端异常值主要集中在涧西区、西工区一带,这主要是

由于在该区内集中了洛阳市主要的加工制造业,重金属污染十分严重,而温和异常值则主要在天龙镇一带出现,其污染源可能是来自于上述的工业污染,也可能是由于附近古遗迹所引起的。箱须图虽然能够真实的刻画变量的分布形态,但其也有不足之处,即它不能提供关于数据分布偏态和尾重程度的精确度量;对于大批量的数据,箱须图反映的形状信息更加模糊;用中位数代表总体平均水平有一定的局限性等等。所以,将其与样品的统计特征参数(见表 1)相结合,共同描述样品数据的分布状态。

偏度是描述数据总体取值分布的对称性,偏度为 0 表示其数据分布形态与正态分布的偏斜程度相同;偏度大于 0 表示其数据分布形态与正态分布相比为正偏或右偏,即有一条长尾巴拖在右边,数据右端有较多的极端值;偏度小于 0 表示其数据分布形态与正态分布相比为负偏或左偏,即有一条长尾巴拖在左边,数据左端有较多的极端值(王红军等, 2008)。偏度的绝对值数值越大表示其分布形态的偏斜程度越大。在表 1 中,除 pH 外,其余所有变量的

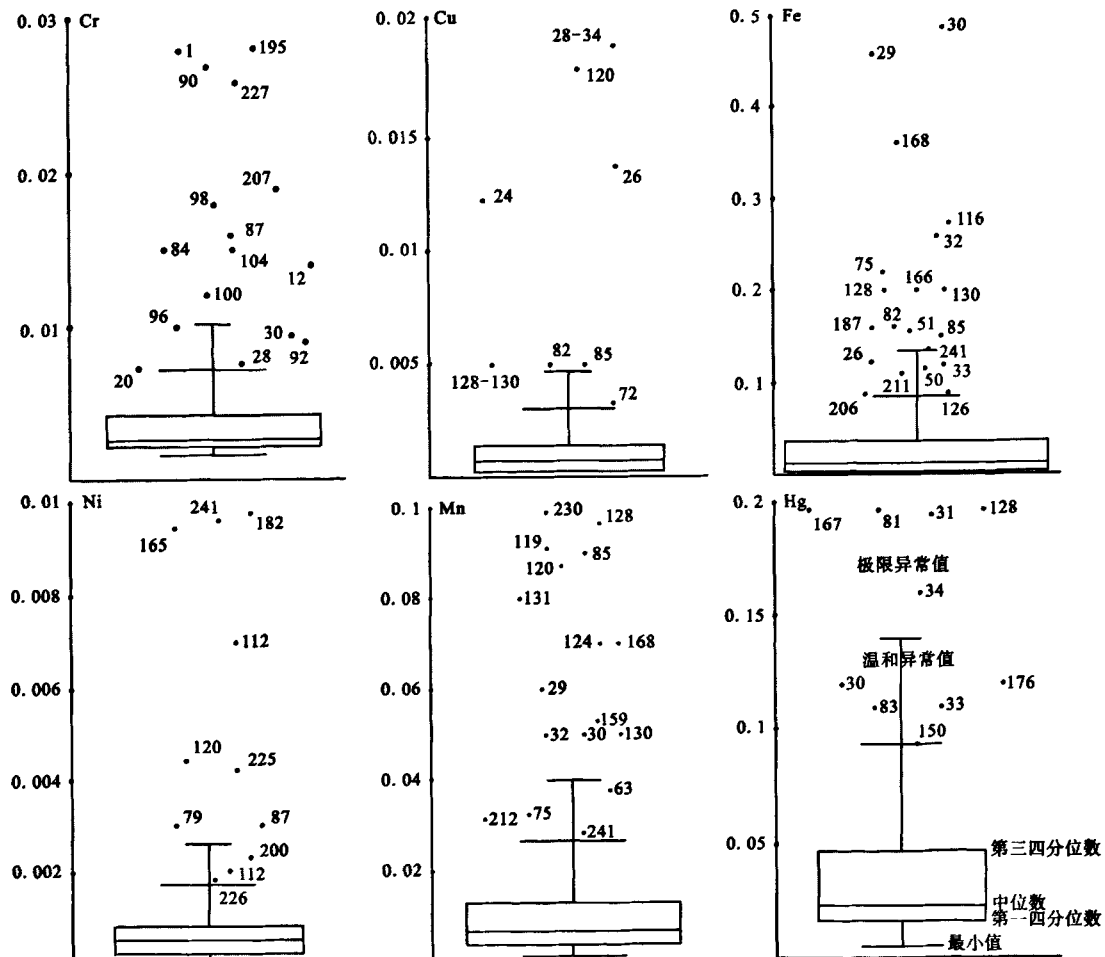


图 2 地下水化学变量箱须图

Fig. 2 Box-whisker plots of individual groundwater chemical variables

表 1 样本数据变量统计
Table 1 Statistics of analytical sample data

变量	样本个数	均值(mg/l)	中位数(mg/l)	最小值(mg/l)	最大值(mg/l)	标准偏差(mg/l)	偏度(mg/l)
Mn	241	0.0345	0.0065	0.0003	1.9070	0.1500	9.564
Fe	241	0.0370	0.0118	0.0001	0.8300	0.0900	6.075
Cu	241	0.0055	0.00075	0.0001	0.1080	0.0150	3.531
Zn	241	0.0600	0.0113	0.0025	1.8090	0.1810	6.264
Ba	241	0.1390	0.1270	0.0197	0.4780	0.0660	1.256
K	241	3.4200	1.1900	0.0640	240.0000	16.3400	13.038
Ni	241	0.00092	0.0005	0.0001	0.03870	0.0031	9.618
Be	241	0.000044	0.00004	0.00001	0.00017	0.000025	2.141
Co	241	0.000412	0.0003	0.0001	0.0029	0.00043	3.242
Cd	241	0.3520	0.0500	0.0010	10.0000	1.6700	5.650
Pb	241	0.9280	0.5000	0.0010	10.0000	1.7300	4.757
As	241	0.7430	0.6200	0.0010	4.4000	0.5280	2.473
Hg	241	0.0580	0.0230	0.00023	1.8000	0.1950	7.886
Se	241	0.9000	0.2200	0.0012	73.9000	5.1400	12.736
NO ₃	241	41.7700	25.4500	0.0200	303.3000	45.6700	2.400
F	241	0.4340	0.4100	0.1500	2.5800	0.2230	4.518
Mo	241	0.0017	0.0011	0.0001	0.0366	0.0030	8.848
Cl	241	43.4000	22.5100	3.9200	452.2000	56.7000	3.650
COD	241	0.8600	0.8000	0.0700	3.2600	0.4500	2.450
NO ₂	241	0.0210	0.0040	0.0004	0.6000	0.0590	6.685
Cu	241	0.0033	0.0020	0.00004	0.0383	0.0050	3.784
Cr ₆	241	0.0046	0.0026	0.0016	0.0400	0.0057	3.969
PO ₄	241	0.0370	0.0200	0.0001	0.4400	0.0483	5.073
I	241	0.0068	0.0015	0.0001	0.0700	0.0149	2.649
TH	241	374.8000	340.9000	67.9800	1554.0000	1.7400	2.196
TDS	241	550.3100	485.5000	114.0000	2789.0000	3.0120	2.625
NH ₃ -N	241	0.0590	0.0470	0.0160	0.3110	0.0410	1.814
pH	241	7.4500	7.5000	3.7000	8.8000	0.4960	-2.865

偏度值均大于0,尤其是重金属离子为甚,偏度值远大于0,即在数据的右端有严重的拖尾现象,这表明了洛阳市浅层地下水重金属污染现象十分严重,出现大量的极端异常值,如 Se、K 离子的最大值分别达 73.49 mg/l、240 mg/l,偏度为 12.736、13.038,表明了在该研究区极端异常值的出现绝非个案或是测量误差,而是该地区 Se 和 K 污染已经异常严重,这可能与能源类企业污染以及基岩风化有关;pH 值的左端拖尾现象,表明了研究区有出现酸污染的趋势,这可能与该区工业污染以及燃煤电厂的大量出现有一定的关联;样品数据中 Mn、Fe、Cu、Zn、Pb 浓度平均值不到最大值的 1/4,表明上述元素在整个研究区污染现象不是十分严重,但在局部地区已形成污染聚集区(Suvedha et al., 2009),结合洛阳市实际情况,局部污染主要集中在涧西区一带;Cenci et al.(2004)研究表明,在地下水中 Ni 离子的浓度根据

污染源不同而保持一定的范围,由生活污水所引起的,其浓度为 0.0003 mg/l,而在农业活动区则维持在 0.00146 mg/l,在表 1 中, Ni 离子均值为 0.00092 mg/l,最大值为 0.0387 mg/l,这表明了在该研究区 Ni 既不是来自于人类日常生活,也非农业活动,主要是来自于工业污染和基岩的化学风化。

2.4 模糊聚类分析

通过分析地下水化学变量的浓度分布特征,利用模糊聚类对收集到的样品进行分类,并列出部分样本点对于各个分类的隶属度,由于本次研究中样品数据过多,对分类结果难以用传统的树形图表达,故直接以表格的形式对分类进行描述(见表 2)。研究区污染源共分为四类:1、分类点主要集中在伊洛河下游与偃师市一带,由于在伊河与洛河上游分布大量中基性火山岩、中游则是以碳酸盐岩为主,地下水在从伊河北岸阶地向偃师市流动的过程中,化学

类型由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 变化到 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, 再变化到 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg-Na}$, 矿化度由 0.2 g/l 渐增到 0.7 g/l, TDS、TH 亦接近于极值(王现国等, 2009)。由于上游中基性火山岩在化学风化的作用下向环境中释放 Mo 离子, 通过渗流作用进入地下水中, 随地下水流运移至伊洛河下游地段, 形成高污染区; 2、该分类中样品数据主要集中在涧西区、西工区一带, 重金属离子均严重超标, 在该区内集中了洛阳市主要工矿企业如铜加工厂、轴承厂、拖拉机厂、重型机械厂等多家知名大型企业。这些企业规模大、建设久, 对周围环境造成的污染较为严重。重金属极端异常值具有以铜加工厂、轴承厂和植物园为中心的 3 个污染区。污染区中心 Cu、Zn、As 达三级或超三级水质标准, 其中 Cu、Zn 最高浓度分别达到 0.108 mg/l、1.809 mg/l; 3、由于石油类与燃煤电厂污水和固体废弃物随意排放, 对周边环境产生重要影响, 造成在伊川—庞村一带地下水中 Cd、Se 离子的严重超标, 在白马寺周围是魏晋时期古陶瓷烧制场, 呈半椭圆状, 面积 2.4 km²。主要为全新统粉砂质粘土, 该区重金属元素 Hg、Cd、Zn、Se 异常, 其它元素含量以正常背景为主; 4、此分类中的样品点主要分布在伊河、洛河、涧河和中州渠等河渠沿岸, 其中涧河、洛河污染指数分别为 4.03、4.02, 主要污染因子为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、Cl、 NO_3 等。在 2009 年洛阳市主要河渠监测评价断面中, 各河渠污染程度由重到轻排序依次为: 瀍河 > 中州渠 > 涧河 > 伊洛河 > 洛河 > 伊河 > 汝河, 洛阳市潜水含水层的主要补给来源为河流补给, 因此河流水质的变化, 将对地下水化学成分产生重要影响(李铎等, 2000)。虽然第三类中三个样品点(见表 2)的重金属离子 Cu、As 等亦超标, 但是由于这些地区受第二类污染源的影响已不显著,

故依据其主要的污染元素, 将其归为单独一类。可见, 通过模糊聚类法能够将洛阳市地下水样品点进行准确的归类, 探明主要的污染类型和污染来源。

在上述聚类分析中, 将 100、178、216 三个样品点归入第三类当中, 但是在这些样品点处 Zn、Cu 等金属离子依然受到第二类污染源的影响。故上述的三个样品点并不完全属于第二或第三类, 该点处的地下水化学变量是多个污染源共同作用的结果。传统的层次聚类法难以对这种模糊关系进行定量化表征。为此本文中引入了模糊聚类法, 将其与因子分析相结合, 利用隶属度的概念对不同污染源对单个样本点的污染贡献率进行定量化表征。以 100 号样品点为例, 该点属于第三类, 其隶属度为 0.959, 表明了该点主要是受第三类污染源的影响, 对于第二类的隶属度为 0.021, 即除第三类外, 第二类污染源对该点的影响最为严重, 且第一类、第四类对该点亦有一定的影响, 在此基础上, 结合因子分析法与洛阳市实际的化学组合特征, 来识别四个分类所对应的污染源及其对各个样本点的污染贡献率。

2.5 因子分析

因子分析是以地下水化学变量作为原始变量, 通过计算变量方差和协方差矩阵的特征向量, 将多个原始变量通过降维转化为少数几个综合变量, 即将地下水中污染物的信息进行集中和提取, 使我们能够从众多污染物中识别出起主导作用的成分。其中方差贡献率反应的是某因子提取原始污染信息的权重, 其方差贡献率越大, 表明该因子的污染贡献率越大, 因子的累计方差贡献率表明取前几个因子基本包含了全部测量指标所具有污染信息的百分率; 因子得分反映的是该因子在某一样品点处的污染贡献, 其值越大表明该因子对样品点处的污染贡献率

表 2 模糊聚类表
Table 2 Table of the fuzzy cluster

样品个数	3	10	3	3
样品号	225 229 230	81 83 120 128 130 165 166 167 168 205	100 178 216	其它样本点
20	0.017	0.005	0.915	0.0630
53	0.020	0.006	0.894	0.0780
81	0.220	0.400	0.250	0.1310
100	0.017	0.021	0.959	0.0020
120	0.038	0.911	0.046	0.0046
165	0.078	0.476	0.423	0.0230
178	0.282	0.057	0.545	0.1160
216	0.148	0.235	0.439	0.1780
225	0.871	0.022	0.034	0.0730
230	0.743	0.043	0.068	0.1460

就越大; 值越小表明该因子对此样本点的污染贡献越小, 值得注意的是, 在因子得分图中, 0 代表的是该因子对样品点的污染贡献为全区的平均值(Yu et al., 2003)。洛阳市地下水污染物因子分析旋转载荷矩阵见表 3, 前 10 个因子累积方差贡献率为 75.508 (>75%), 其余因子对总方差贡献率占 24.492%, 故上述因子已经足以代替众多污染信息进行污染物识别。

因子分析将地下水主要污染元素进行了归类, 但是还需结合污染源化学成分组合确定其主要来源。国内外学者对不同来源的地下水污染物作了大量研究, 区分出不同污染源的主要排放元素(Venugopal et al., 2008; Li et al., 2010), 但在具体研究中还应结合洛阳市实际的地质环境特征, 洛阳为 9 朝古都, 留有大量魏晋时期的古遗迹, 不断地向周围环境中释放一些重金属离子如: Cu、Cd 以及微量

元素 P、Se(宫进忠等, 2009); 与人类活动相比, 中基性硅酸岩和碳酸盐岩的化学风化与 Mn、K 离子相关性更为显著; 洛阳市燃煤中含有大量的 As 元素, 可以将 As 元素作为燃煤污染的主要标志之一(姜英等, 2010)。因此在借鉴前人研究成果的基础上(谈恒文等, 2005), 结合研究区的实际情况, 可得洛阳市地下水污染源化学成分组合(见表 4)。

因子 1 与 TDS、Cl、NO₃ 离子的相关系数较大(见表 3), 结合模糊聚类分析与洛阳市地下水污染源化学成分组合(表 4), 可知此因子为人类活动因子, 对污染的总贡献率为 20.291%, 通过(图 3-F1)可知 7、101、158、240 等样品点在因子 1 的得分较高, 上述点主要集中在新安、龙门一带, 表明了此区域地下水中 Cl、NO₃ 主要是受人类活动的影响(Bengraïne et al., 2003); 因子 2 与 Cu、I、Hg、Fe 离子的相关系数较大, 依据表 4 判定其为加工制造业因子, 对污

表 3 因子载荷矩阵
Table 3 Loading component matrix

因子	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TH	0.894	0.021	0.083	0.101	-0.234	0.059	0.043	0.038	-0.011	-0.065
TDS	0.893	0.176	0.058	0.182	0.052	0.109	0.062	0.028	-0.030	0.074
Cl	0.803	0.080	-0.015	0.327	0.132	0.016	0.008	0.032	-0.035	0.035
NO ₃	0.725	-0.219	-0.030	-0.162	-0.253	-0.027	-0.016	0.126	0.015	0.024
Cu	-0.005	0.761	0.391	0.012	0.026	0.103	-0.123	0.007	-0.047	-0.037
Fe	-0.110	0.749	-0.058	-0.054	0.003	0.118	0.004	0.057	-0.028	-0.074
I	0.242	0.738	0.235	0.329	0.074	0.092	0.051	-0.015	-0.012	0.050
Hg	0.067	0.618	0.157	-0.016	-0.186	-0.207	0.017	0.000	-0.033	0.106
Pb	0.026	0.230	0.895	-0.020	-0.051	-0.048	0.064	-0.034	-0.017	-0.132
Cd	0.047	0.308	0.877	-0.009	-0.068	-0.029	0.089	-0.017	-0.025	-0.006
Ni	0.076	-0.046	0.514	-0.018	0.214	0.186	-0.233	0.358	-0.111	0.118
Mn	0.176	0.139	-0.020	0.889	0.030	0.091	-0.045	-0.026	0.027	0.015
K	0.173	-0.039	-0.029	0.865	0.004	-0.037	-0.002	-0.008	-0.042	-0.023
F	-0.139	-0.012	-0.098	-0.113	0.679	0.191	0.080	-0.156	-0.036	0.164
Mo	-0.055	-0.119	0.109	0.144	0.575	-0.011	-0.006	0.000	0.101	-0.019
NH ₃ -N	-0.129	-0.108	0.022	0.263	-0.497	0.350	0.153	0.222	0.024	0.352
Ph	-0.284	0.156	-0.205	0.028	0.432	-0.085	0.065	0.273	-0.235	-0.142
Ba	0.045	-0.015	0.063	0.127	-0.118	-0.675	-0.328	-0.020	-0.041	0.044
Co	0.164	0.163	0.017	0.243	0.116	0.546	-0.360	0.046	-0.005	0.038
Be	0.352	-0.032	0.125	0.150	-0.246	0.516	-0.183	-0.154	0.021	0.015
Se	0.190	0.109	-0.047	-0.091	0.067	0.030	0.629	-0.088	-0.088	-0.090
PO ₄	-0.065	-0.120	0.089	0.102	-0.010	0.011	0.594	0.068	0.112	0.127
NO ₂	0.215	0.025	0.014	-0.101	-0.073	-0.090	-0.086	0.769	0.064	0
COD	-0.117	0.019	0.043	0.357	-0.175	0.182	0.242	0.471	0.052	0.026
CN	0.038	-0.086	0.004	0.059	-0.122	0.062	-0.085	-0.078	0.817	0.030
Cr ₆	-0.101	0.033	-0.113	-0.094	0.225	-0.040	0.187	0.212	0.649	-0.057
Zn	-0.089	0.027	0.138	0.029	0	-0.043	-0.034	-0.040	0.041	-0.827
As	-0.079	0.390	0.266	0.040	0.081	-0.236	-0.046	-0.131	0.103	0.467
累积方差贡献(%)	20.291	34.615	43.756	49.569	54.445	59.108	63.500	67.600	71.633	75.508

表 4 洛阳市地下水污染源化学成分组合
Table 4 Chemical components combination of groundwater in Luoyang City

污染源		污染物离子组合
基岩风化	中基性火山岩	Cd K Mn Mo Cr
	碳酸盐岩	Ni Ca Mg
加工制造业		Cu Zn Fe Cd CN Hg Pb
能源企业/古遗迹	能源企业	Hg Cd As Se PO ₄
	古遗迹	Se As Hg Cd Cu
人类活动		TH Cl NO ₃ NH ₃ -N

染的总贡献率为 14.324%。在(图 3-F2)中, 30、81、120、128、168、130、166、167 等 11 个样品点在因子 2 的得分较高, 上述点主要集中在涧西区与西工区一带, 此区域的重金属污染主要是由加工制造

业所引起的。在因子 2 中得分较高的样品点与模糊聚类分析的中结果基本一致, 30 号样品点(朝阳镇)的出现表明了加工制造业所排放的 Cu、Hg、Fe 等离子对朝阳镇一带已造成严重影响。

与因子 3 具有较高相关系数的离子是 Pb、Cd、Ni, 其污染源为: 加工制造业和基岩风化。该区域内 Pb 污染主要来源于洛阳市涧西工业区和西工区一茹凹一带。对于 Cd、Ni 元素的来源则要复杂一些, 其主要存在于褐土当中, 褐土是洛阳市主要土壤类型之一, 褐土中 Cd、Ni 含量明显高于区域背景值, 主要与基岩风化有关。在洛阳市涧西工业区、伊河北部的龙门—焦寨一带和孙村等地, 区内 Cd、Ni 变量有一定程度的二次叠加, 是加工制造业和基岩化学

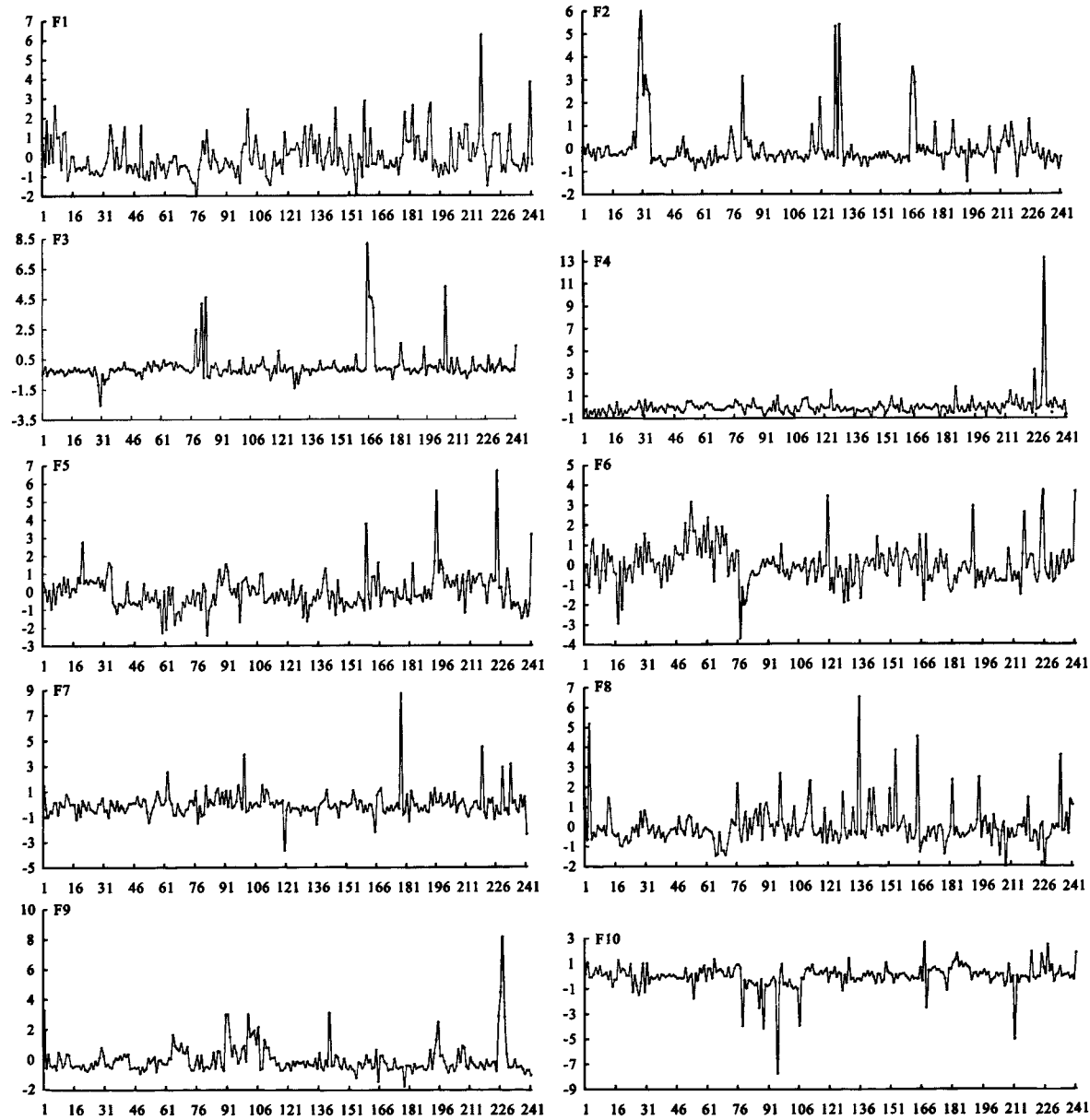


图 3 因子得分图
Fig. 3 Factor score diagram

风化两个污染源共同作用的结果。除 30 号样品点外, 因子 2 与 3 中高因子得分点完全一致, 这表明了加工制造业所排放的 Cu、Hg、Fe 等离子已运移至 30 号样品点(朝阳镇)一带, 但 Pb、Cd 等离子的污染范围尚未扩散至此, 由此可见, 模糊聚类 and 因子分析法亦可以对各种离子的运移范围做出精确描述; 与因子 4 相关系数较高的变量是 Mn、K, 结合洛阳市地下水污染源化学成分组合, 可知该因子为基岩风化因子。在该因子得分较高的样品点(图 3-F4)为 225、229、230, 这与模糊聚类的分析结果完全一致, 样本点主要集中在会盟一回郭镇一带, 此处位于伊洛河下游, 由于伊河与洛河中上游基岩不断风化, K、Mn、Ca 等元素随着地下水不断迁移, 从而在下游地段形成高异常区, 这一点在此区域的高 TH(总硬度)值亦有所体现, 该因子对污染的总贡献率为 5.813%。

因子 5 与 F、Mo 离子的相关系数较高, 其因子得分较高(图 3-F5)的样品点为 20、159、165、182、194、224、241。由于伊河、洛河上游主要是由中基性硅酸盐组成, Mo 离子主要来源于硅酸盐岩风化所形成的潮褐土; F 离子主要来源于人类活动(Saxena et al., 2003), 故从伊川到龙门、安乐一带地下水中 Mo、F 离子的污染源为基岩风化与人类活动; 因子 6 中具有较高相关系数的化学变量是 Co、Be, 其因子得分较高的样品是 53、120、191、216、224、225、241, 这表明了虽然在洛河上游马店、韩城镇一带其主要污染源为由洛河与灌溉渠渗流所引起的人类生活污染, 但在该地区的地下水中 Co、Be 元素则来源于涧西区的加工制造业。

与因子 7 具有较高相关系数离子是 Se、 PO_4 , 根据其污染物组合, 上述离子主要来源于古遗迹、能源型企业, 该污染源主要集中在白马寺、龙门镇、寇镇一带, 其高因子得分样品点: 100、178、216、229、233, 除 229、233 外, 与模糊聚类分析的结果基本一致, 即该因子为能源企业/古遗迹因子。229 和 233 号样本点表明该因子污染范围已经扩散至葛寨与回郭一带; 在因子 8 中, 与其相关系数较高的离子主要是 NO_2 、COD, 主要来源于人类生活污水的排放(Fernandes et al., 2010), 该因子得分较高的样本点为 3、136、154、182、195、235, 主要位于排污渠两岸, 表明上述点中的 NO_2 、COD 污染主要来自于人类活动。

与因子 9 相关系数较高的化学变量为 Cr、CN 离子, 其中 CN 离子来源于涧西区工业污染, Cr 离子

则来源于工业污染和伊洛河上游的基岩风化, 在因子 9 中得分较高的样品点 1、90、101、141、195、227 号, 这些样品点主要污染源来自于人类活动, 但其中的化学变量 Cr、CN 则受加工制造业和基岩风化的污染(高永娟等, 2005); 因子 10 中具有较高相关系数的变量为: $\text{NH}_3\text{-N}$ 、As, 因子得分较高的点为 167、183、219、227, 此因子中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 As 主要污染来源为人类农业灌溉和燃煤电厂(卞建民等, 2010)。

在本次研究中, 利用模糊因子分析法来识别地下水污染来源, 并定量化表征不同污染源对整个研究区和单个样本点的影响。通过因子分析可知, 与表 2 中四个分类所对应的分别是 4、2、7 和 1 号因子, 其所代表的污染源分别是基岩风化、加工制造业、能源企业/古遗迹和人类活动。1、基岩风化污染, 主要是由于伊河、洛河上游中基性火山岩和中游的碳酸盐岩风化所引起的, 其影响范围主要集中在偃师市一会盟一回郭一带, 对整个研究区的污染贡献率为 5.813%; 2、加工制造业污染源, 主要位于涧西区、西工区工业基地, 由工业污水与废渣的排放与堆积所造成的, 污染贡献率为 14.324%, 是洛阳市内的第二大污染源, 其污染范围主要集中在涧西区、西工区内, 部分重金属离子 Co、Be 最远向西扩散至洛河上游马店、韩城镇一带; 3、能源企业/魏晋古遗迹, 此污染源的贡献率为 4.392%, 所造成的污染范围较小, 主要集中于伊洛河下游白马寺一带; 由于燃煤电厂不断向地下水中排放硫化物, 在庞村镇一翟镇一带形成酸污染区; 4、人类活动污染源, 这主要是由于人类的生活污水、灌溉用水等直接排入河流进而通过渗流补给对地下水造成污染, 研究区 6 个大型的垃圾填埋场在雨水淋滤的作用下亦对地下水产生影响, 该污染源是洛阳市第一污染源, 其污染贡献率为 20.291%, 其污染范围分布较广, 沿东西走向呈条带状分布, 几乎遍布整个洛阳市区。

地下水资源对洛阳市工农业发展有着至关重要的作用, 在利用模糊多因子分析法识别其污染源的基础上, 根据不同污染源对整个研究区及样本点处的污染贡献率, 为地下水污染防治提供决策依据。对整个洛阳市而言, 首先要对人类日常生活中所产生的污水与垃圾进行无害处理, 在农业灌溉中减少化肥与农药的使用, 其次是对市区加工制造业要严格管理, 减少三废污染物的产生与排放, 故严格控制人类活动和加工制造业排放物是洛阳市浅层地下

水污染治理的主要途径;对于单个的样本点,则要根据其主要的污染来源制定具体的污染防治措施。因子2为加工制造业污染因子,这意味着在模糊聚类的第二类中所有采样点处的地下水污染物主要来自于加工制造业,但同时还受到其它三种污染源的影响。故在模糊聚类中的隶属度不仅表征了某一个样本点对于分类的隶属程度,通过与因子分析相结合,其同时也代表了与这些分类所对应的污染源对单个样本点的污染贡献率。以120号样本点为例,研究区内四类污染源对该样本点的污染贡献率为:加工制造业91.1%,人类日常活动4.6%,基岩风化3.8%,能源企业/古遗迹0.46%。该样本点处的Cu、Hg、I、Co、Be、Pb元素主要来源于区内的加工制造业,诸如洛阳铜加工厂、轴承厂一类的企业;Cd、Ni则主要来源于伊洛河中上游的基岩风化;该样品点在因子7(能源企业/古遗迹因子)中的因子得分为极小值,表明了能源企业/古遗迹污染源对该点处的Se、PO₄污染基本上没有产生影响,这与表2中第三类污染源对该点污染贡献率仅为0.46%这一结果是相吻合的。故对加工制造业中三废污染物的无害处理、重型污染企业的搬迁与工艺改善是此样本点处地下水污染防治的主要措施,这与整个洛阳市的地下水污染防治是有区别的。

3 结论

模糊因子分析统计法可以成功探明研究区内的污染类型,定量化表征不同污染源对整个研究区和单个样品点的污染贡献率,查明不同污染物扩散范围。最重要的是,该方法可以根据采样点处的主要污染源,为其提供具体的污染防治措施,做到有的放矢。模糊因子分析法可以为地下水污染评估与防治提供有效、合理的依据。

参考文献:

- 卜建民,查恩爽,汤洁,马力,陈刚. 2010. 吉林西部砷中毒地区高砷地下水反向地球化学模拟[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 40(5): 1098-1103.
- 杜晓舜,夏自强. 2003. 洛阳市水资源可利用量研究[J]. 水文, 23(1): 14-20.
- 高永娟,马腾,刘存富,蔡鹤生. 2005. 稳定同位素⁵³Cr在地下水污染研究中的应用[J]. 地球学报, 26(S1): 296-298.
- 宫进忠,李广平. 2009. 中国七大古都的地球化学环境特征[J]. 中国地质, 36(5): 1154-1162.
- 郭友琴,强山峰,务宗伟,王现国. 2006. 洛阳市水资源现状及地下水动态分析预测[J]. 人民黄河, 28(7): 63-66.

- 韩菲,马溪平,刘颖颖. 2009. 辽河水中PAHs的污染水平及源解析[J]. 气象与环境学报, 25(6): 68-71.
- 姜英,连进京,龙小玲,杨慧,李增强. 2010. 燃煤中砷、汞的特征及分布规律研究[J]. 煤质技术, (5): 4-7.
- 李铎,宋雪琳,张燕君. 2000. 傍河地下水水源地污染模式研究[J]. 地球学报, 21(2): 202-206.
- 谈恒文,张子军,安丰芹. 2005. 日照市东港区地下水环境质量现状评价[J]. 地球学报, 26(2): 173-177.
- 王红军,田铮,武新乾. 2008. 二元正态混合模型的偏度与峰度[J]. 系统仿真学报, 20(4): 855-858.
- 王淑红,孙永峰,董风芝. 2009. 基于主成分分析法的神经网络模型与箱线图在选厂中的应用[J]. 中国矿业, 18(11): 107-109.
- 王现国,郭立. 2009. 洛河冲积平原包气带对人渗水污染物净化能力研究[J]. 水文地质工程地质, 36(6): 123-130.
- 温国明,李翔,马红霞,刘秀玲. 2007. 洛阳市饮用水源地水质安全研究[J]. 中国安全科学学报, 17(3): 15-20.
- 钟文丽,邓江红. 2006. 拉拉铜矿水环境质量评价及污染因子分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 36(S1): 100-104.

References:

- ADABANIJA M A, OMIDIORA E O, OLAYINKA A I. 2008. Fuzzy logic modeling of the resistivity parameter and topography features for aquifer of assessment in hydrogeological investigation of a crystalline basement complex[J]. Hydrogeology Journal, 16(3): 461-481.
- BENGRABINE K, MARHABA T F. 2003. Using Principal Component Analysis to Monitor Spatial and Temporal Changes in Water Quality[J]. Journal of Hazardous Materials, 100(1-3): 179-195.
- BEZDEK J C. 1981. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms[M]. New York: Plenum Press.
- BIAN Jian-min, ZHA En-shuang, TANG Jie, MA Li, CHEN Gang. 2010. Inverse Geochemical Modeling of Arsenic Groundwater at Arseniasis Area in the Western of Jilin Province[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 40(5): 1098-1103(in Chinese with English abstract).
- CENCI R M, MARTIN J M. 2004. Concentration and Fate of Trace Metals in Mekong River Delta[J]. Science of the Total Environment, 332(1-3): 167-182.
- DHAGE S S, CHANDORKAR A A, KUMAR R, SRIVASTAVA A, GUPTA I. 2006. Marine Water Quality Assessment at Mumbai West Coast[J]. Environment International, 32(2): 149-158.
- DU Xiao-shun, XIA Zi-qiang. 2003. Study on the Available Water Resources in Luoyang City[J]. Hydrology, 23(1): 14-20(in

- Chinese with English abstract).
- FERNANDES P G, CARREIRA P, BAHIR M. 2010. Mass Balance Simulation and Principal Components Analysis Applied to Groundwater Resources: Essaouira Basin (Morocco)[J]. *Environment Earth Sciences*, 59(7): 1475-1484.
- GAO Yong-juan, MA Teng, LIU Cun-fu, CAI He-sheng. 2005. The Application of Stable Chromium Isotope ^{53}Cr to the Study of Groundwater Pollution[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(S1): 296-298(in Chinese with English abstract).
- GONG Jin-zhong, LI Guang-ping. 2009. Geochemical Environmental Characteristics of China's Seven Ancient Capitals[J]. *Geology in China*, 36(5): 1154-1162(in Chinese with English abstract).
- GUO You-qin, QIANG Shan-feng, WU Zong-wei, WANG Xian-guo. 2006. Analysis and Forecast for Groundwater Dynamic and Resource in Luoyang City[J]. *Yellow River*, 28(7): 63-66(in Chinese).
- HAN Fei, MA Xi-ping, LIU Ying-ying. 2009. Pollution Level and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs) in Liaohe River[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 25(6): 68-71(in Chinese with English abstract).
- JIANG Ying, LIAN Jin-jing, LONG Xiao-ling, YANG Hui, LI Zeng-qiang. 2010. Research on the Characteristic and Distribution Rules of Arsenic and Mercury from Coal Combustion[J]. *Coal Quality Technology*, (5): 4-7(in Chinese with English abstract).
- LI Duo, SONG Xue-lin, ZHANG Yan-jun. 2000. A Study on the Pollution Model of Groundwater Supply Source Beside the River[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 21(2): 202-206(in Chinese with English abstract).
- LI S Y, ZHANG Q F. 2010. Spatial Characterization of Dissolved Trace Element and Heavy Metals in the Upper Han River (China) Using Multivariate Statistical Techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3): 579-588.
- RAZO I, CARRIZALES L, CASTRO J, FARNANDO D B, MONROY M. 2004. Arsenic and Heavy Metal Pollution of Soil Water and Sediments in a Semi-arid Climate Mining Area in Mexico[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 152(1-4): 129-152.
- SAJN R. 2006. Factor Analysis of Soil and Attic-dust to Separate Mining and Metallurgy Influence, Meza Valley, Slovenia[J]. *Mathematical Geology*, 38(6): 735-747.
- SAXENA V K, SHAKEEL A. 2003. Inferring the Chemical Parameters for the Dissolution of Fluoride in Groundwater[J]. *Environment Geology*, 43(6): 731-736.
- SHEN F, FU S B, REN S S, WU C J. 2007. Sensitivity Appraisal of Acidizing Fluid with Gray Association Analysis[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 14(2): 56-58.
- SOH S C, ABDULLAH M P. 2007. Determination of Volatile Organic Compounds Pollution Sources in Malaysian Drinking Water Using Multivariate Analysis[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 124(1-3): 39-50.
- SUVEDHA M, GURUGNANAM B, SUGANYA M, VASUDEVAN S. 2009. Multivariate Statistical Analysis of Geochemical Data of Groundwater in Veeranam Catchment Area, Tamil Nadu[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 74(5): 573-578.
- TAN Heng-wen, ZHANG Zi-jun, AN Feng-qin. 2005. Underground Water Environmental Quality Evaluation of Donggang District, Rizhao City, Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(2): 173-177(in Chinese with English abstract).
- VENUGOPAL T, GIRIDHARAN L, JAYAPRAKASH M. 2008. Groundwater Quality Assessment Using Chemometric Analysis in the Adyar River South India[J]. *Archives of Environment Contamination and Toxicology*, 55(2): 180-190.
- WANG Hong-jun, TIAN Zheng, WU Xin-qian. 2008. Skewness and Kurtosis of Mixture Models with Two Gaussian Components[J]. *Journal of System Simulation*, 20(4): 855-858(in Chinese with English abstract).
- WANG L, WANG Y P, XU C X, AN Y Z, WANG S M. 2011a. Analysis and Evaluation of the Source of Heavy Metals in Water of the River Changjiang[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173(1-4): 301-313.
- WANG Shu-hong, SUN Yong-feng, DONG Feng-zhi. 2009. Application of ANN BP model based on principal component analysis method and in mineral processing plant[J]. *China Mining Magazine*, 18(11): 107-109(in Chinese with English abstract).
- WANG S L, JIANG H Q. 2011b. Determine level of thief zone using fuzzy ISODATA clustering method[J]. *Transport in Porous Media*, 86(2): 483-490.
- WANG Xian-guo, GUO Li. 2009. A Study of Purification Capacity of Vadose Zone on Pollutants from Infiltration Water in the Luohe Alluvial Plain[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 36(6): 123-130(in Chinese with English abstract).
- WEN Guo-ming, LI Xiang, MA Hong-xia, LIU Xiu-ling. 2007. Research on Water Quality Safety of Drinking Water Source in Luoyang[J]. *China Safety Science Journal*, 17(3): 15-20(in Chinese with English abstract).
- WU W, XIE D T, LIU H B. 2009. Spatial Variability of Soil Heavy Metals in the Three Gorges Area: Multivariate and Geostatistical Analyses[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,

- 157(1-4): 63-71.
- YIDANA S M, OPHORI D, BRUCE B Y. 2008. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains Area, Ghana[J]. *Environment Geology*, 53(6): 1213-1223.
- YIDANA S M, YIDANA A. 2010. Assessing Water Quality Using Water Quality Index and Multivariate Analysis[J]. *Environment Earth Sciences*, 59(7): 1461-1473.
- YU S X, SHANG J C, ZHAO J S, GUO H C. 2003. Factor Analysis and Dynamics of Water Quality of the Songhua River, North-east China[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 144(1): 159-169.
- ZHONG Wen-li, DENG Jiang-hong. 2006. The Evaluation of Water Environmental Quality and the Pollution Factor Analysis for the Lala Copper Mine, Sichuan Province[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 36(S1): 100-104(in Chinese with English abstract).

负小苏副部长一行考察“深部探测技术与实验研究”专项

2011年7月21日上午,国土资源部副部长负小苏一行到中国地质科学院深部探测研究中心考察“深部探测技术与实验研究”(SinoProbe)国家专项,指导工作。

中国地质科学院党委书记、副院长王小烈主持会议。深部探测技术与实验研究专项负责人、中国地质科学院副院长董树文研究员向负小苏副部长一行汇报了深部探测专项执行概况、已取得的重要探测技术进展和重大发现,以及组织申报《地壳探测工程》国家立项的初步方案。

负小苏副部长在听取专项汇报和大家发言后发表了重要讲话,着重谈了3点建议和意见:第一,专家委员会组织一次专项中期评估,对专项原定目标、进展情况、技术路线、技术方法进行评估,进一步完善和提高专项技术水平,确保专项圆满完成既定目标,并对专项已经取得成果的作用进行评估。同时,组织一次专项中期财务检查。第二,在评估基础上理顺相关问题和下一步的设想,专门向财政部汇报一次,包括项目、课题和经费调整等。第三,要研究同国土资源部“358”找矿突破计划如何有机结合好。他认为,通过不断的发现、不断的深化认识,专项必将取得比预期更好的成果。他建议,还应增加在仪器装备研发创新和组织管理机制创新等方面的宣传。他强调,要一如既往地抓好后续工作,切实保障专项资金安全。

负小苏副部长指出,《地壳探测工程》是一个系统工程,事关我国从地质大国走向地质强国,带动地质工作的方方面面,意义重大,申报国家重大科技专项很有必要,也有扎实的基础。他要求,一定要抓紧研究论证,报部党组研究,尽快与有关部门沟通,推动早日立项。

陪同负小苏副部长考察的还有国土资源部科技与国际合作司文波处长、何凯涛调研员和办公厅办公室周霆,中国地质调查局李金发副局长、科技外事部连长云副主任。中国地质科学院朱立新常务副院长,专项各项目负责人及代表石耀霖院士、魏文博教授、高锐研究员、吕庆田研究员、王学求研究员、吴才来研究员、张怀副教授、郭子祺研究员等专家,中国地质科学院办公室张民福主任、计财处张海波处长、科技处吴珍汉处长,以及专项办公室有关人员等约30人参加了会议。

本刊编辑部 采编