基于GIS的鄂尔多斯白垩系盆地地下水水质的模糊综合评价

苏耀明[1,2],苏小四[3],侯光才[3,4],朱 琳[1,2]
SU Yao-ming[1,2], SU Xiao-si[3], HOU Guang-cai[3,4], ZHU Lin[1,2]

1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100037; 2.资源环境与GIS北京市重点实验室,北京 100037;
3.吉林大学环境与资源学院,吉林 长春 130026; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054
1. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing* 100037, *China*;
2. *Beijing Key Lab of Resources and Environment and GIS, Beijing* 100037, *China*;
3. *College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun* 130026, *Jilin, China*;
4. *Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an* 710054, *Shaanxi*, *China*

摘要:开展科学合理的地下水水质评价工作,可以为地下水资源的可持续开发利用和水污染防治提供科学依据,具有重要的理论意义和实际价值。以地下水水质量标准为基础,通过构建科学合理的地下水水质评价指标体系,以GIS为平台,运用模糊综合评价方法对鄂尔多斯白垩系盆地地下水水质进行了综合评价。评价结果表明,盆地北区地下水水质总体上相对较好,不同埋藏深度的地下水水质差异并不很大;盆地南区地下水水质总体上相对北区较差,中、深层地下水水质普遍较差,地下水水质类别主要为Ⅳ、Ⅴ类。

关键词:GIS;鄂尔多斯白垩系盆地;地下水水质评价;模糊综合评价
中图分类号:P641 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2008)08-1178-08

Su Y M, Su X S, Hou G C, Zhu L. Fuzzy integrated evaluation of groundwater quality in the Cretaceous Ordos artisan basin, China based on GIS. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8):1178-1185

Abstract: Scientific and rational groundwater quality evaluation has great theoretical significance and social values because it can provide scientific guidance on the sustainable exploitation and utilization of groundwater resources and protection of groundwater pollution. With the groundwater quality standard as the basis, an scientific and rational evaluation index system of groundwater quality has been built and with the platform of GIS, the fuzzy integrated evaluation method has been used to evaluate the groundwater quality in the study area. The results of evaluation indicate that the groundwater quality is generally good in the northern part of the basin and that the groundwater quality does not vary much at different depths. However, the groundwater quality in the southern part of the basin is generally poor as compared with the northern part and the quality is mainly of grades IV and V.

Key words: GIS; Cretaceous Ordos artisan basin; groundwater quality evaluation; fuzzy integrated evaluation

鄂尔多斯盆地作为中国重要的能源重化工基地,在实施西部大开发战略总体格局中占有重要地位。但由于地处干旱—半干旱的内陆地区,水资源短缺和生态环境恶化问题比较突出[1]。如何充分合理地开发利用现有的地下水资源已经成为影响该地区社会经济发展的关键问题。作为鄂尔多斯白垩系盆

收稿日期:2008-05-15;**修订日期**:2008-07-11
基金项目:中国地质调查局国土资源调查项目《鄂尔多斯盆地地下水勘查》(编号:1212010331302)、教育部博士点基金项目(编号:20030027020)和资源环境与地理信息系统北京市重点实验室开放基金项目资助。
作者简介:苏耀明(1981-),男,在读博士,从事GIS在水资源评价与管理中的应用研究。E-mail:sym_cnu@163.com
通讯作者:苏小四(1971-),男,副教授,从事地下水资源评价与管理、同位素水文地球化学研究。E-mail: suxiaosi@jlu.edu.cn

地地下水资源评价的重要组成部分,开展地下水水质评价工作可以为研究区地下水资源的可持续开发利用和科学管理提供很好的指导作用,也可以为研究区人民群众的生活和工农业生产用水安全提供可靠的保障。

作为地下水水质评价的工具和手段,地下水水质评价方法是否合理是地下水水质评价结果客观与否的关键。随着科学技术的不断发展,世界各国的专家学者对地下水水质评价方法进行了深入的探索,也提出了很多评价方法和模型。但由于评价因子与水质等级间的非常复杂的非线性关系,以及水体污染的随机性和模糊性,对于地下水水质评价至今仍没有一个被广泛接受的评价模型。由于地下水水质评价中的污染程度、水质类别都是一些客观存在的模糊概念和模糊现象[2],简单地根据某一数字界线来对地下水水质进行研究和评价是不合适的。模糊集理论在地下水水质评价中的应用与传统的评价方法相比更适应于水质污染级别划分的模糊性,能更客观地反映水质的实际状况。因此模糊数学方法在地下水水质综合评价中得到了广泛的应用并取得了很好的效果[3-4],成为目前地下水水质评价的常用方法。模糊综合评判问题实质上就是模糊变换的问题。在地下水水质评价过程中需要考虑很多影响因素,例如隶属函数和权重矩阵的构造、模糊变换过程中算子的选取等,其中权重矩阵的构建是地下水水质模糊综合评判中最关键的问题[5]。目前有关权重矩阵的确定方法有很多,传统的方法如专家法、指标值法等,近些年,层次分析法、多元统计分析中的主成分分析和因子分析方法、灰色关联法、神经网络[6]和遗传算法[7]等被广泛应用于权重的确定,但这些方法在地下水水质评价中的应用都存在自身的一些不足[8]。如何更好地确定地下水各水质评价指标间的权重还有待进一步深入研究。

地理信息系统(geographic information system,GIS)是对空间地理信息进行存储、分析、管理、应用的计算机系统,自20世纪60年代诞生以来,发展非常迅速[9]。由于地下水的形成、赋存和运移具有非常明显的空间和时间分布特征,这在很大程度上决定了地下水勘查过程中获得的大量数据具有非常丰富的空间信息和内涵[10],使得GIS在水资源环境领域得到了广泛的应用。

本文利用自1998年以来研究区内新生界、罗汉洞组、环河组、洛河组4个含水层位1000多个钻孔的地下水水化学资料,通过构建地下水水质评价指标体系,以GIS为平台,对研究区地下水水质的空间分布规律进行研究,同时分别对研究区浅层、中间层和深层地下水水质进行了评价。

1　研究区概况

鄂尔多斯白垩系盆地位于鄂尔多斯盆地中西部(图1),面积约为$13.21\times10^4 km^2$。研究区总的地势特点是东高西低、北高南低,中部地势稍有隆起。中部隆起的白于山呈东西走向,将整个盆地划分为南北2个截然不同的地貌单元,南北分别为黄土高原和沙漠高原。

研究区是一个由多个含水岩类构成的巨型地下水盆地。含水岩组从地表向下可以划分为新生界含水岩组、罗汉洞含水岩组、环河含水岩组和洛河含水岩组。前人对研究区水文地质条件的研究业已表明,盆地北区包括白垩系含水岩系在内的各含水岩组实际上构成了一个具有密切水力联系的含水综合体。在局域、中间和区域等不同级别地下水循环系统的控制作用下,地下水化学场的空间分布明显受循环深度的制约[11]。按循环深度的不同,盆地北区地下水可以大致划分为浅、中、深3层。浅层地下水主要埋藏于新生界萨拉乌苏组、浅表白垩系风积沙层和盆地西北部的白垩系罗汉洞含水岩组;中间层地下水主要埋藏于环河含水岩组中上部;而深层地下水主要埋藏于环河含水岩组中下部和洛河含水岩组。盆地南区由于上覆巨厚的黄土层,白垩系地下水补给条件较差。且白垩系保安群中泥质含量较多,沉积韵律清楚,地层分层明显,含水岩组之间存在相对稳定的区域隔水层。按照含水层的时代,盆地南区的含水层可以划分为新生界黄土含水岩组和白垩系罗汉洞含水岩组、环河含水岩组、洛河含水岩组。

从盆地南北2区地下水循环深度看,盆地北区的浅、中、深层地下水大体上分别与盆地南区的新生界含水岩组和白垩系罗汉洞含水岩组、环河含水岩组、洛河含水岩组地下水相对应。

2　评价指标体系和评价标准的建立

2.1　评价指标体系

评价指标体系的构建以国家地下水质量标准(GB/T 14848-1993)中对地下水水质参评指标的要

求为基础,结合研究区社会发展的用水需求、居民用水安全等因素进行的。具体选择时考虑如下几点。

(1)针对鄂尔多斯白垩系盆地水资源现状、实际用水需求,首先选取了分布广泛且对整个研究区地下水水质起主要控制作用的常规组分指标,如总硬度、溶解性总固体、Cl^-、SO_4^{2-}、pH指标[12]。

(2)考虑到研究区部分地区人类活动导致了比较严重的三氮污染问题,同时区内部分地区还存在高F和I缺乏所引起的地方性氟中毒、克山病、大骨节病、食道癌等地方病高发区[13],为达到保障当地群众饮用水安全的目的,因此将总铁、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、氟化物也考虑作为本次地下水水质综合评价的评价因子。

(3)Fe、Cu、Mn、Zn、As、Cr^{6+}、Cd和Pb这8个微量元素指标在天然水中含量甚微,对水化学性质及水化学类型没有明显的影响。但是这几个指标在地下水中浓度的大小却对生态环境起着重要的作用,对人类和其他生物体的生长发育有着重要的影响[14]。

因此,本次评价最终选取了pH、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、氟化物、TFe、Cu、Mn、Zn、As、Cr^{6+}、Cd和Pb共17个评价指标。

2.2 评价标准

水质标准是开展水质评价工作的依据和基础。本次研究选取了地下水质量标准(GB/T 14848-1993)为评价标准。该国标以中国地下水水质现状、人体健康基准值和地下水质量保护目标为依据,为国内的地下水资源保护和管理提供了科学的依据,为用水安全提供了可靠的保障。但是在水质评价的实际工作中,由于中国幅员辽阔,不同地区的环境地理特点、气象条件、经济技术水平、政治文化要求等诸多因素各不相同,因此在不同地区的水质标准实际应用过程中不应该简单地按照国家标准进行"一刀切"[15]。应该结合当地的实际情况,对国标中不包含或不符合地区实情的某些项目进行补充和修订,对人体健康危害巨大的指标如As、Pb等指标则应严格控制其限值。

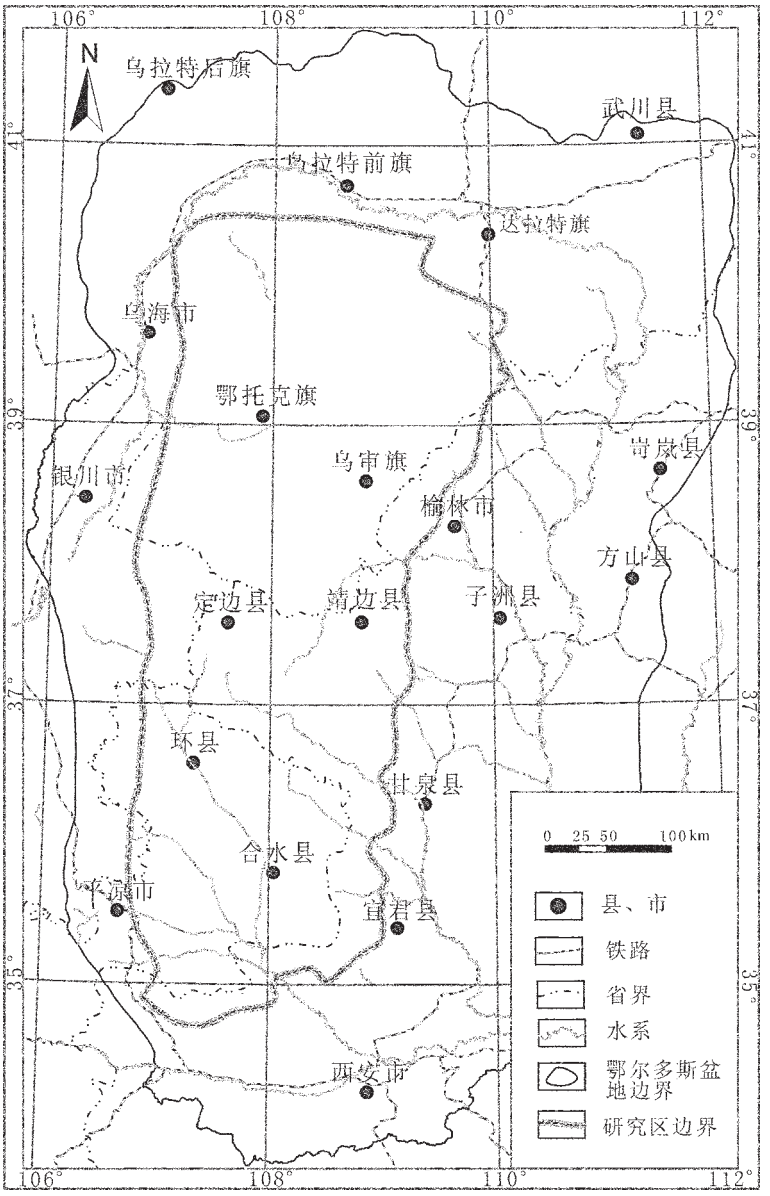


图1 鄂尔多斯白垩系盆地的地理位置和研究区范围

Fig. 1 Geographic location of the Cretaceous Ordos basin and limits of the study area

本次开展地下水水质评价时针对现行地下水质量标准在研究区实际应用中存在的不足,结合研究区的实际情况,对某些指标限值进行了修正(修正结果如表1)。修正后的标准既不影响当地群众生产、生活用水的迫切需要,也不会对当地居民的身体健康

产生任何的影响。其中对总硬度、硫酸盐、氟化物指标增加了Ⅰ类最小限值[16-17];溶解性总固体和氟化物指标的Ⅲ类限值参照"农村实施《生活饮用水卫生标准》准则"进行了适当的放宽;As、Pb指标的Ⅲ类限值参考世界卫生组织2004年新修订的饮用水质量标准(WHO Water Drinking Guidelines)进行了修正。

3　模糊综合评价方法

自20世纪60年代模糊集合理论创立以来，这一理论很快在社会、经济、科技、信息等众多领域得到了广泛的应用，成为解决多指标综合问题的一种有效武器。在地下水水质评价中的应用很好地解决了水质分级的模糊性问题。

3.1　隶属函数的构建

隶属函数在模糊综合评判中占有重要的地位。在地下水水质评价的过程中，由于现行水质标准中大部分指标质量类别都是单向分布的(即水质状况随着指标浓度值从小到大或从大到小的变化，而由好变差),采用半梯形分布函数法可以简单明了地刻画出水质状况随着各评价指标浓度的变化而变化的实际情况。

3.2　评价因子权重的确定

评价因子的相对权重反映了各个评价因子对于地下水水质好坏的"贡献"大小。从权的概念及其特性出发,较好的赋权方法应该是同时考虑指标之间的离散度和重要度并能将二者有机结合[20]。而单一的客观赋权方法很难同时兼顾到指标的离散度和重要度,为此本次评价采用了熵值法和因子分析相结合的综合赋权方法。

(1)因子分析方法确定初始权重

利用多元统计分析中的因子分析方法从资料的信息量和系统效应的角度来确定地下水质综合评价体系中的权重，可以很好地克服人为主观因素的影响，使评价结果更加客观准确。同时以最少的信息丢失为前提[21],通过降维和信息浓缩,使得数据处理的难度大大降低,并能很好地反映出各评价因子对水质好坏影响的贡献大小(重要度)。

(2)熵值法确定差异性系数

在信息论中,信息熵是系数无序程度的度量。在地下水质评价中,水质状况的优劣与参评指标的"混乱"程度即浓度有关,指标超标越严重(浓度值与国标限值的差异程度越大),指标的信息熵越小,该指标所能提供的信息量越大。因此引入熵值的概念,通过利用熵值法求解差异性系数，可以很好地表征水质状况的优劣程度，反映地下水中各参评指标的离散程度。假设有m个水样数据,每个水样有n个评价指标,则由这m个数据构成的原始数据矩阵$X=(x_{ij})_{m\times n}$中,根据下式(式(1)~(3))可计算出差异性系数g_j:

$$P_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}}\quad(j=1,2,\cdots n)\tag{1}$$

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}P(y_{ij})\ln P(y_{ij})\quad(j=1,2,\cdots n)\tag{2}$$

$$g_j=1-e_j\quad(j=1,2,\cdots n)\tag{3}$$

表1　单项水质分类限值修正表

Table 1　Revision of the limit values of single-item water quality classification

项　目	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
总硬度/mg·L^{-1}(以$CaCO_3$计)	40~150	150~300	300~450	450~550	<40，>550
溶解性总固体[18]/mg·L^{-1}	≤300	≤500	≤1500	≤2000	>2000
硫酸盐/mg·L^{-1}	15~50	50~150	150~250	250~350	<15，350
氟化物/mg·L^{-1}	0.3~1.5	0.3~1.5	0.3~1.5	1.5~2.0	<0.3，>2.0
As/mg·L^{-1}[19]	≤0.005	≤0.01	≤0.01	≤0.05	>0.05
Pb/mg·L^{-1}[19]	≤0.005	≤0.01	≤0.01	≤0.1	>0.1

表2　鄂尔多斯白垩系盆地地下水水质评价指标综合权重

Table 2　Integrated weight of groundwater quality evaluation indices in the Cretaceous Ordos basin

评价指标	pH	TDS	总硬度	总铁	NH_4	Cu	Pb	Zn	Mn
综合权重	0.0033	0.1302	0.1486	0.0355	0.0583	0.000006	0.0589	0.0109	0.0482
评价指标	As	Cr^{6+}	Cd	Cl	SO_4^{2-}	NO_3^-	NO_2^-	F	
综合权重	0.0386	0.0318	0.0156	0.1285	0.1338	0.0456	0.0219	0.0901	

式(1)(2)(3)中,m为水样个数,n为参评指标个数,x_{ij}表示第i个水样的第j个参评指标的实测浓度;P_{ij}表示参评指标j下水样i的实测浓度在所有水样中占的比重;e_j为参评指标j的熵值;g_j为参评指标j的差异性系数。

(3)根据差异性系数对初始权重进行修正

利用第i个参评指标的差异性系数对该指标的初始权重a_i进行修正,即可求得修正后的权重r_i:

$$r_i=a_i\times g_i \quad (i=1,2,\cdots n) \qquad (4)$$

式(4)中,a_i表示运用因子分析方法确定的参评指标i的初始权重;g_i表示参评指标i的差异性系数;r_i为差异性系数修正后的i指标的权重。

对r_i进行规一化处理得到各评价指标最终的综合权重r^*_i:

$$r^*_i=\frac{r_i}{\sum r_i} \quad (i=1,2,\cdots n) \qquad (5)$$

式(5)中,r_i表示差异性系数修正后的i指标的权重;r_i^*为综合权重。

利用熵值法修正因子分析的综合赋权方法较好地考虑了各参评指标之间的重要程度和离散程度。从各参评指标的综合权重得分值可以看出(表2),总硬度、硫酸盐、溶解性总固体、氯化物、氟化物指标的权重都相对较大,反映了这些指标的浓度变化对研究区地下水水质变化所起的作用相对较大,是主要的影响因素。

3.3 模糊综合变换

在地下水水质模糊综合评价中,各评价指标提供的信息量是非常重要的,因此在进行模糊变换时选用取大和取小相加算子显然是不合适的,这样会大大降低权系数的信息量,相当于有“权”不用[15]。而相乘取大和相乘相加算子通过乘法运算较好地综合考虑了权系数和隶属度的共同作用。因此本次评价过程中选用了相乘取大算子进行模糊变换,这样可以在综合考虑各评价因子对地下水水质污染贡献状况的同时,适当突出污染主因子的影响。

4 鄂尔多斯白垩系盆地地下水水质空间分布规律

不同等级水质的区域分布规律主要受常规组分浓度的控制,而微量组分只对局部地段的水质产生

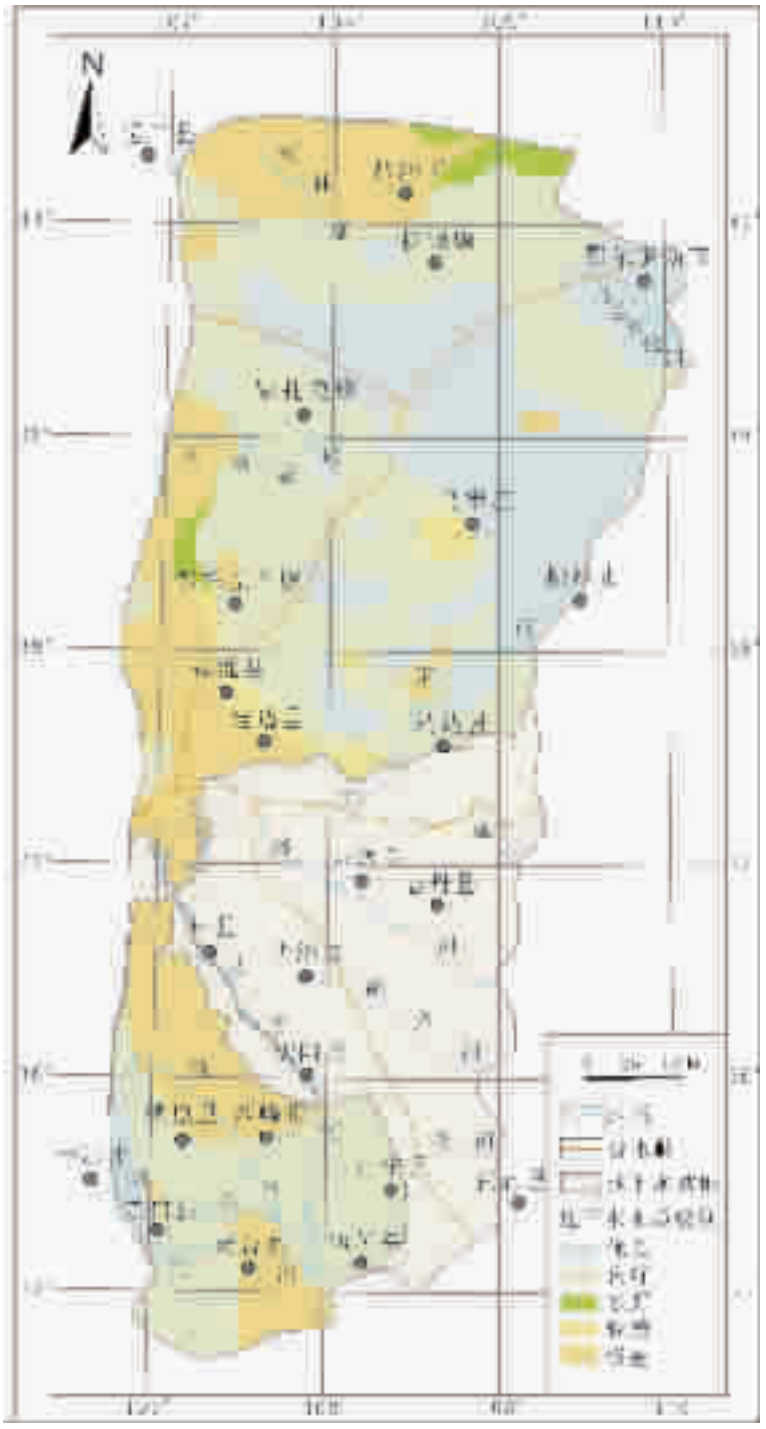


图2 浅层地下水水质模糊评价结果分区图

Fig. 2 Zones of results of fuzzy evaluation of shallow groundwater quality

影响。为此,根据综合评价结果,以GIS为平台,对总硬度、硫酸盐、溶解性总固体等重权指标的超标区进行空间叠加。在此基础上,结合研究区的地质和水文地质条件、城镇和耕地的分布状况等因素的影响,对研究区地下水水质的分布规律进行了研究并绘制出水质分区图(图2—图4)。

4.1　浅层地下水水质的空间分布规律

研究区内大部分地区浅层地下水水质普遍较好,主要为Ⅰ、Ⅱ类水。盆地北区,地下水质的分布主要受地表分水岭的影响,表现为由分水岭向北部、西部边界径流过程中水质由优变劣的正向变化规律;盆地南区则主要受含水层的覆盖程度和含水层含盐量的影响,水质空间分布表现出一定的反向变化规律。

从浅层地下水水质模糊综合评价水质分区图(图2)可看出,Ⅰ类水质水主要分布在盆地北区新召苏木分水岭及其两侧、东胜-四十里梁分水岭以东的大部分地区,南区西缘边界一带也有小范围的分布,水中总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物指标含量都普遍低于或接近于地下水化学组分的天然低背景含量,水质优良。Ⅱ类水质水在区内分布范围广泛,主要沿浅层地下水径流方向分布于Ⅰ类水两侧。Ⅲ类水质水分布于盆地北区盐海子以北边界一带和鄂托克前旗西北的布拉格苏木查汗温都尔一带。Ⅳ类水质水在鄂托克前旗以西布拉格苏木巴音察汗一带和乌审旗以西陶利苏木地区有小范围分布。Ⅴ类水质水主要分布在研究区沙漠高原西部、北部边界和研究区南部环县—庆阳及其以西地区、径川—灵台县一带,在研究区北部东缘边界一带有零星分布。该类型水主要表现为总硬度、溶解性总固体、氯化物、硫酸盐指标超标较严重,在乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和研究区北部边界巴音恩格尔—东水力乡一带的部分地区还存在硝酸盐、亚硝酸盐、氟化物指标严重超标的情况,导致水质极差。

4.2　中间层地下水水质的空间分布规律

从中间层地下水的水质分布状况(图3)可看出,研究区中间层地下水水质普遍较好,Ⅱ类水质水分

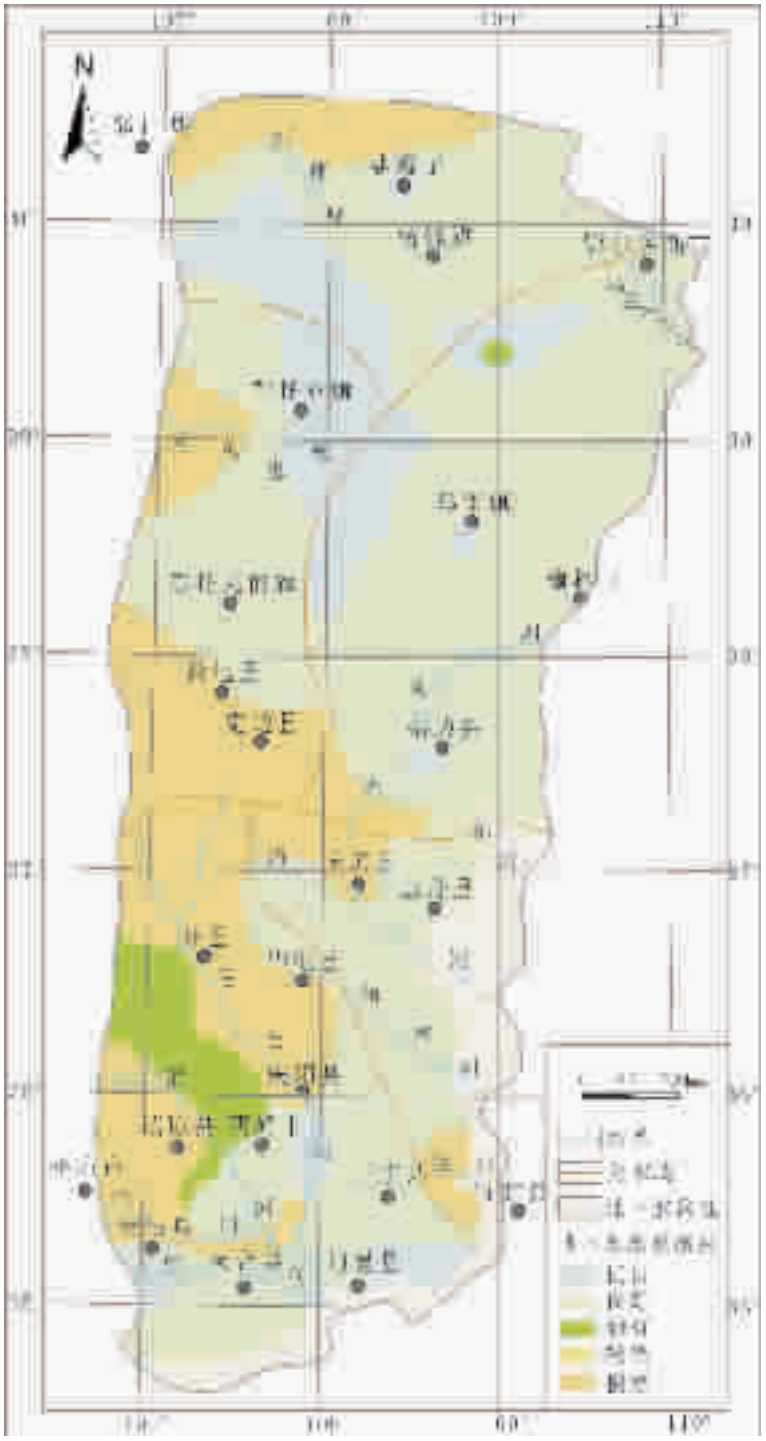


图3　中间层地下水水质模糊评价结果分区图

Fig. 3　Zones of results of fuzzy evaluation of intermediate groundwater quality

布范围最广。Ⅰ类水质水主要分布在盆地北区沿东胜-四十里梁、新召苏木分水岭一带和南区西峰—合水、崇信、正宁等地。由于上部浅层好水的垂向下渗补给，地下水中大部分指标含量都低于或接近地下水化学组分的天然低背景含量。Ⅲ类水质水主要集中分布于盆地南区西峰西北部地区，在盆地北区乌审旗浩勒报吉乡有零星分布。Ⅳ类水质水在区内没有构成面状分布。Ⅴ类水质水主要分布在盆地北区北缘盐海子—磴口以北边界一带、鄂托克旗以西边界地区、盐池—定边以西一带和盆地中部白于山分水岭两侧，盆地南区环县—庆阳—华池—吴旗一带及其西北部的大部分地区、镇原—宁县一带、正宁以东边界一带地区，水中溶解性总固体、总硬度、氯化物、硫酸盐指标超标严重，部分地区的总铁、硝酸盐、亚硝酸盐也存在超标现象。

4.3 深层地下水水质的空间分布规律

见图4。Ⅰ类水质水主要分布在盆地北区东缘边界一带地区、东胜-四十里梁中部鄂托克旗东北地区和研究区南部志丹—正宁以东边界一带、西南缘边界一带地区。Ⅱ类水质水主要分布于盆地北区东胜-四十里梁分水岭及其两侧大范围的地区和南区志丹—华池—正宁一带。Ⅲ类水质水仅在盆地南区吴旗—华池和正宁以东地区有小范围的分布。Ⅳ类水质水主要集中分布于盆地南区西南缘镇原—西峰—灵台一带，分布范围较小。Ⅴ类水质水主要分布在研究区北部边界一带、中部靖边—吴旗一带和南部环县—庆阳—西峰—合水—正宁一带，该类型水中溶解性总固体、总硬度、氯化物、硫酸盐指标超标较严重。部分地区的总铁、氟化物指标也存在超标现象，水质极差，不适宜饮用。

5 结论和建议

(1)为了更好地适应中国社会、经济飞速发展和人民生产生活的需要，应不断地加强有关地下水水资源保护法律法规的建设和相关标准的修订更新工作。2005年和2006年，国家新颁布了《城市供水水质标准CJ/T206-2005)》[22]和新的《生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)》[23]，对城市供水和生活用水水质安全提出了更高的要求。新标准的制定参考了世界卫生组织、

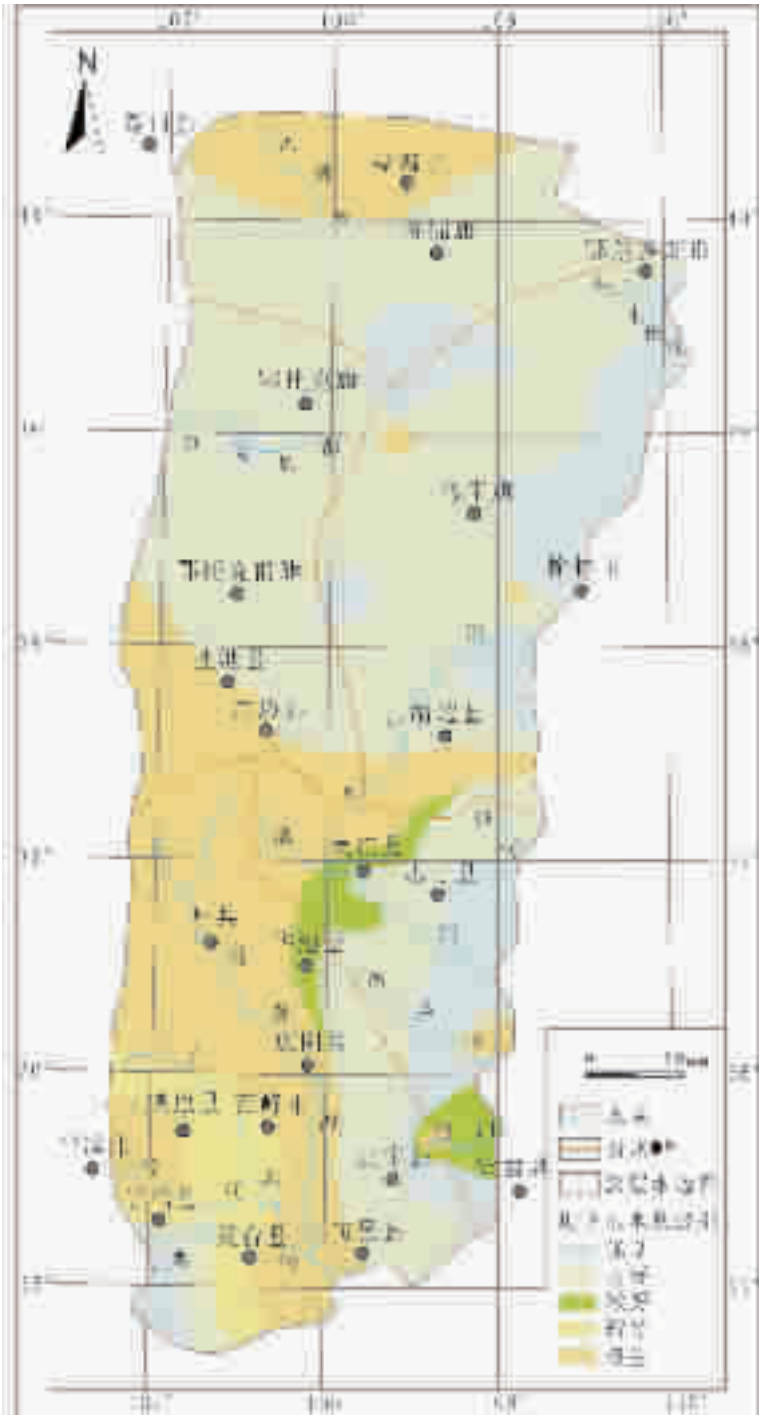


图4 深层地下水水质模糊评价结果分区图

Fig. 4 Zones of results of fuzzy evaluation of deep groundwater quality

欧盟等国际组织及美、日、俄等发达国家的水质标准,同时也结合国情,对生活用水水质的各项指标严格要求,水质指标项目的数量大幅增加。以此为契机,中国地下水质量标准也应尽快修订和完善,使水质标准能满足经济社会快速发展的需要,更好地为居民用水安全提供保障。同时为避免出现"一刀切"的情况,还应结合不同地区的环境特点、气象条件、经济技术水平等要素,建立相应的地区标准。

(2)运用熵值法修正的因子分析赋权方法对参评指标进行了综合赋权,指标权重得分值反映出总硬度、硫酸盐、溶解性总固体、氯化物指标的水化学分布对研究区地下水水质变化的影响最为明显。

(3)从研究区地下水水质综合评价结果可以看出,盆地北区地下水水质总体上相对较好,不同埋藏深度的地下水水质差异并不大,地下水水质主要以Ⅱ类为主,完全符合当地群众生活饮用和工农业生产用水水质要求;而南区地下水水质总体上相对北区较差,地下水水质主要以Ⅳ、Ⅴ类水为主。

(4)在地下水水质较好的地区,通过加强对地表水和地下水之间的合理调配,结合分质供水和综合利用的用水原则,因地制宜地开采浅层和深层地下水,可以很好地缓解研究区水资源匮乏的现状,为研究区社会、经济的可持续发展提供保障。

参考文献:

[1]王德潜,刘方,侯光才,等.鄂尔多斯盆地地下水勘查[J].西北地质,2002,35(4):167-173.

[2]梅学彬,王福刚,曹剑锋.模糊综合评判法在水质评价中的应用及探讨[J].世界地质,2000,19(2):172-177.

[3]束龙仓,邱汉学.济宁市开采层地下水水质的FUZZY综合评价及FORTRAN程序[J].长春地质学院学报,1988,18(4):431-440.

[4]付雁鹏,高嘉瑞.模糊数学在水质评价中的应用[M].武汉:华中工学院出版社,1986:64-85.

[5]苏耀明,苏小四.地下水水质评价方法的现状及展望[J].水资源保护,2007,23(2):4-9.

[6]孙会君,王新华.应用人工神经网络确定评价指标的权重[J].山东科技大学学报(自然科学版),2001,20(3):84-86.

[7]霍映宝,韩之俊.基于广义最大熵原理和遗传算法的多指标权重确定方法研究[J].数理统计与管理,2005,24(3):39-50.

[8]孙才志,廖资生.水质模糊评价中污染因子赋权方法的改进及应用[J].勘查科学技术,1998,16(6):3-6.

[9]宫辉力,赵文吉,李小娟,等.地下水地理信息系统——设计、开发与应用[M].北京:科学出版社,2006:1-46.

[10]陈刚,陈植华,李门楼,等.基于GIS的水资源管理信息系统[J].水文地质工程地质,1998,(6):4-6.

[11]侯光才,林学钰,苏小四,等.鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(3):391-398.

[12]江珊,孙继朝,李政红.西北地区地下水质量评价[J].水文地质工程地质,2004,(4):96-100.

[13]张拴厚,赵金祥,陆爱明,等.黄河中游黄土高原地质与生态环境[J].陕西地质,2000,18(1):40-55.

[14]蓝翁驰.微量元素与生态环境的相关性[J].中央民族大学学报(自然科学版),2004,13(2):163-168.

[15]潘乃礼.地下水水质现状和预测评价的理论与方法[M].北京:原子能出版社,1995:3-19.

[16]林学钰,陈梦熊,王兆馨,等.松嫩盆地地下水资源与可持续发展研究[M].北京:地震出版社,2000:68-146.

[17]廖资生,林学钰,杜新强.松嫩盆地地下水水质评价图的编图原则与方法[J].地球科学进展,2003,18(2):299-304.

[18]全国爱卫会,卫生部.农村实施《生活饮用水卫生标准》准则[S].1991.

[19]World Health Organization.Guidelines for Drinking-Water Quality,third edition. Vol. 1,Recommendations [S]. Geneva: World Health Organization, 2004:306-394.

[20]李宏艳.权重确定法的多目标评价模型[J].理论新探,2004,172(4):22.

[21]薛薇.SPSS统计分析方法及应用[M].北京:电子工业出版社,2004:326-340.

[22]中华人民共和国建设部.城市供水水质标准(CJ/T206-2005)[S].北京:中国标准出版社,2005.

[23]中华人民共和国卫生部.生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)[S].北京:中国标准出版社,2006.