

四川盆地西缘浅层地下水铁、锰含量的空间变异特征

胡玉福^{1,*}, 邓良基¹, 张世熔¹, 倪福全², 张 杰¹

(1. 四川农业大学资源环境学院; 2. 四川农业大学信息工程学院, 四川雅安 625014)

摘要:以四川盆地西缘低山丘陵区典型县——名山县为例,采用地统计分析方法,研究了四川盆地西缘低山丘陵区浅层地下水铁、锰含量的空间变异特征。结果表明,研究区浅层地下水铁含量变异较大,局部区域超标现象较为严重,42.86%的样点未达到欧盟生活饮用水水质标准($<0.2\text{ mg/L}$),25%的样点未达到我国和美国生活饮用水水质标准($<0.3\text{ mg/L}$);锰含量总体水平较低,其中94.64%的样点达到我国的生活饮用水水质标准($<0.1\text{ mg/L}$),所有样点均达到世界卫生组织规定的生活饮用水水质标准($<0.4\text{ mg/L}$)。研究区浅层地下水中铁、锰含量空间分布特征基本一致,均呈现出从东北向西南逐渐降低,至名山县城附近又有所上升的趋势,高值区主要出现在东北部一带,低值区主要出现在中南部一带。研究区地下水中铁、锰含量分布特征与区域土壤母质、土壤类型、人为活动等因素密切相关,其中受土壤母质和土壤类型的影响尤为明显。统计结果表明,第四系更新统冰碛物及冰水沉积物(Q_{2gl})分布区域地下水铁、锰含量显著高于白垩系夹关组(K_{2j})、灌口组(K_{2g}),第三系名山群(K_{1-2m})等紫色岩分布区域;黄壤下浅层地下水铁、锰含量显著高于紫色土。

关键词:浅层地下水;铁;锰;空间变异;饮用水水质标准;四川盆地

文章编号:1000-0933(2009)02-0797-07 中图分类号:P332.7,Q149,X523 文献标识码:A

Spatial variability of iron and manganese contents in shallow groundwater in the west of Sichuan Basin

HU Yu-Fu^{1,*}, DENG Liang-Ji¹, ZHANG Shi-Rong¹, NI Fu-Quan², ZHANG Jie¹

1 College of Resources and Environment of Sichuan Agricultural University

2 College of Information and Engineering Technology of Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0797 ~ 0803.

Abstract: Iron and manganese are necessary elements for human health, but too much iron or manganese will be harmful to human's health. It is well known that groundwater was the main source of rural drinking water in China, and iron and manganese contents in groundwater have important effect on drinking water quality. Studies of spatial variability of iron and manganese in groundwater are helpful for the Rural Drinking Water Safety. Mingshan county, between Sichuan Basin and Western Plateau in Sichuan, China, is a typical low mountain and hill region. In this region, the Rural Drinking Water Safety was still serious because of dispersed population, inconvenient traffic and information, undeveloped economy, lack of infrastructure and so on. So that, spatial variability of iron and manganese contents in shallow groundwater in Mingshan county were studied by methods of traditional statistics and geostatistics.

Using random sampling method, 56 sample points were selected in research area. Iron and manganese contents in shallow groundwater were analyzed by atomic absorption spectrometry method. The geostatistical characteristics, spatial trend and azimuth of anisotropic axle of iron and manganese contents were analyzed using the Geostatistical Analyst, ArcGIS 9.0. We created contour maps of iron and manganese contents for the study area using Kriging interpolation.

Traditional statistical analysis (descriptive statistics) showed that the average contents of iron and manganese were 0.27 mg/L and 0.10 mg/L. The coefficient of variation (CV) of iron and manganese contents were 52.12% and 30.34%.

基金项目:国家星火计划资助项目(2005EA810087);四川省教育厅青年基金项目资助(2006B002)

收稿日期:2007-07-27; 修订日期:2008-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:hyf03h@yahoo.com.cn

The iron content in groundwater was high in general, 42.86% of sample points did not reach the drinking water quality criterion (less than 0.2 mg/L) prescribed by EU, 25% of sample points did not reach the drinking water quality criterion (less than 0.3 mg/L) prescribed by the Chinese Government and American Government. The highest value of iron content was 3.34 mg/L, which was exceeded the national standard to a large extent. In generally, manganese content in groundwater was low, 94.64% of sample points reached the drinking water quality criterion (less than 0.1 mg/L) prescribed by the Chinese Government, and 100% of sample points reached the drinking water quality criterion (less than 0.4 mg/L) prescribed by WHO.

The geostatistics analysis showed that the trends of iron and manganese contents in groundwater were second order in the east—west and north—south direction, the structure variability of iron and manganese contents was all larger than the random variability, the spatial variability was obvious in northeast—southwest. Spatial distribution characteristics of iron and manganese contents in shallow groundwater in the research area were similar, it decreased gradually from northeast to southwest, but increased near the town of Mingshan county. The highest value region mainly existed in the northeastern. The lowest value region mainly existed in the middle and south. The spatial distribution characteristics of iron and manganese contents in groundwater were closely related to hypsography, parent materials of soil, soil types and human activities. The iron and manganese contents in groundwater in regions of glacial till and fluvioglacial sediments of Quaternary System Pleistocene ($Q_{2\text{figl}}$) were significantly higher than in regions of purple rock of Cretaceous Jiaguan formation (K_{2j}), Cretaceous Guankou formation (K_{2g}) and Tertiary Mingshan formation ($K_{1-2\text{mm}}$). The iron and manganese contents in groundwater in regions of yellow soil significantly higher than in regions of purple soil.

Key Words: shallow groundwater; iron; manganese; spatial variability; standard for drinking water quality; Sichuan Basin

铁、锰元素是人体所必需的元素,但饮用水中过量的铁、锰元素含量也会对人体健康造成威胁^[1~5]。据全国爱卫会、卫生部调查,我国农村生活饮用水的水源主要以地下水为主,饮用地下水的人口占 74.87%,地下水超标率为 45.94%,其中地下水铁、锰含量超标是影响地下水水质的重要因素^[6~7]。目前国内外有关地下水铁、锰的研究,主要集中在富集机理、分布规律、影响因素及祛除技术和工艺等方面^[8~15],但有关铁、锰元素在地下水中的区域性空间变异和分布特征的研究报道较少,其中董维红等对人类活动对哈尔滨市高铁地下水时空分布的影响进行了研究^[16]。本文以四川盆地西缘低山丘陵区典型县——名山县作为研究区域,拟用基于 GIS 的地统计学方法对其浅层地下水铁、锰元素的空间变异特征进行研究,力求为该区农村饮水安全工作提供参考。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地西缘,幅员面积 614.27 km²,海拔 548 ~ 1456 m,气候属亚热带季风性湿润气候,雨量充沛,终年温暖湿润,年均气温 15.4℃,最高气温 35.2℃,年均降雨量 1500 mm。研究区地处蒙山背斜与总岗山背斜之间的向斜槽谷(名山向斜),向斜整体呈北东—南西走向,地势西南高东北低,东北部逐渐过渡到川西平原。第四系松散沙砾石层孔隙水及基岩裂隙水为研究区主要地下水类型。向斜槽部开阔,以第四系孔隙含水堆积物为主,第四系孔隙含水岩组主要为第四系更新统冰碛物及冰水沉积物($Q_{2\text{figl}}$)、近代河流洪、冲积物(Q_4)风化泥砂砾卵石层,含水层东厚西薄,有效厚度 4 ~ 30 m,覆盖在白垩系上统夹关组(K_{2j})、灌口组(K_{2g}),下第三系名山群($K_{1-2\text{mm}}$)等地层上。向斜两翼地下水以基岩裂隙水为主,包括风化裂隙水和层间裂隙水,含水岩组主要为白垩系上统夹关组(K_{2j})、灌口组(K_{2g}),下第三系名山群($K_{1-2\text{mm}}$)等地层紫色岩,厚度 410 ~ 870 m,其中,白垩系上统夹关组(K_{2j})、灌口组(K_{2g})地层在向斜两翼呈对称条状分布。第四系孔隙水及基岩风化裂隙水为潜水,基岩层间裂隙水为承压水,本研究主要以潜水层作为研究对象。地下水补给主要为大气降水的入渗补给和水平方向的侧向径流补给,排泄主要以潜水径流补给地表水和人工开采为主。研究区农

村人口分散,经济发展相对滞后,基础设施较薄弱,生活饮用水的水源主要以地下水为主,饮用地下水的人口占 86%。

1.2 样品采集与测定

地下水采样点的设计主要考虑地形地貌、水文、母质、土壤、人口分布等因素,采用随机抽样布点的方法,在 1:5 万地形图上概略确定采样点位置,共布设样点 56 个。野外采样根据实地情况调整后,用 GPS(Etrex)定位读取采样点坐标。主要采集层潜水层地下水,分组同时采样,取样深度为 2~8 m,压水井井头取水,采集水样 0.6 L 用聚乙烯塑料杯盛装,加硝酸至 $\text{pH} \leq 2$ 保存,当天及时送回室内测定,水样中的铁、锰含量按国家生活饮用水标准检验法(GB-T 5750-2006),采用原子吸收分光光度法测定^[17]。

1.3 数据处理与分析

数据分析采用常规统计学和地统计学方法。常规统计用 SPSS 12.0 软件进行,用 ArcGIS 9.0 软件进行半方差分析、趋势分析以及结合普通 Kriging 插值方法获得地下水铁、锰元素含量等值线图。

2 结果分析与讨论

2.1 常规统计分析

常规统计结果表明,研究区浅层地下水中铁含量介于 0.11~0.34 mg/L,平均值为 0.27 mg/L,总体水平较高,局部区域超标现象较为严重。在 56 个水样中,达到欧盟生活饮用水水质标准(<0.2 mg/L)的样点占 57.1%;达到我国和美国生活饮用水水质标准(<0.3 mg/L)的样点占 75.00%^[18];若以我国农村小型集中式供水和分散式供水的水质指标限值 0.5 mg/L^[18],89.29%的样点符合国家农村饮用水水质要求,10.71%的样点地下水铁含量超标,其中超标最严重的样点位于区域东北部的茅河乡,地下水铁含量高达 3.34 mg/L,比我国生活饮用水指标限值(0.1 mg/L)高 33.4 倍(表 1,表 2)。研究区浅层地下水中锰含量介于 0.05~0.23 mg/L,平均值为 0.10 mg/L,总体水平较低。在 56 个水样中,达到欧盟和美国生活饮用水水质要求(<0.05 mg/L)的样点占 10.71%,达到我国生活饮用水水质标准(<0.1 mg/L)的样点占 94.64%^[18],所有的样点均达到世界卫生组织规定的生活饮用水水质标准(<0.4 mg/L)和我国农村小型集中式供水和分散式供水的水质指标限值(0.3 mg/L)。从变异系数来看,研究区浅层地下水铁、锰含量的变异系数均大于 30%。其原因主要是由于区域内分布不同的土壤母质和土壤类型,而不同的土壤母质和土壤类型下地下水的铁、锰含量背景值有较大的差异。铁、锰含量的分布均达不到正态分布的要求,但若将二者进行对数转换后统计,则二者的偏

表 1 地下水铁、锰含量常规统计特征

Table 1 Statistical characteristic of iron and manganese contents in groundwater

项目 Item	样点数(n) Sampling No.	最小值 Min (mg/L)	最大值 Max (mg/L)	均值 Mean (mg/L)	变异系数 CV (%)	分布类型 Distribution type	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness
铁 Fe	56	0.11	3.34	0.27	52.12	对数正态 ^①	6.63	2.42
锰 Mn	56	0.05	0.23	0.10	30.34	对数正态	4.89	0.54

①Lognormal distribution

表 2 地下水中不同铁、锰含量范围统计表

Table 2 Statistical results of different Range of iron and manganese contents in groundwater

铁含量范围 Range of Fe content (mg/L)	样点数 Sampling No. (n)	比例 Percentage (%)	锰含量范围 Range of Mn content (mg/L)	样点数 Sampling No. (n)	比例 Percentage (%)
0.10~0.20	32	57.14	0.00~0.05	6	10.71
0.20~0.30	10	17.86	0.05~0.10	47	83.93
0.30~0.50	8	14.29	0.10~0.23	3	5.36
0.50~3.34	6	10.71			
合计 Total	56	100.00	合计 Total	56	100.00

度值分别为 2.42 和 0.54,峰度值分别为 6.63 和 4.89,经单样本的 K-S 检验,铁元素的 $Z = 0.48$,双尾概率 $P = 0.83$,锰元素的 $Z = 0.85$,双尾概率 $P = 0.74$,结果表明二者均符合正态分布的要求。

2.2 空间变异的趋势分析

图 1、图 2 分别为铁、锰元素空间分布趋势图,图中 Y 轴代表正北方向,X 轴代表正东方向,Z 轴代表各点位测定值的大小,左后投影面上的曲线表示东——西向的全局性趋势效应变化,右后投影面上的曲线表示南——北向的全局性趋势效应变化。由图可见,研究区地下水铁、锰元素含量全局性趋势呈弧型,表明具有一定程度的 2 阶趋势效应。

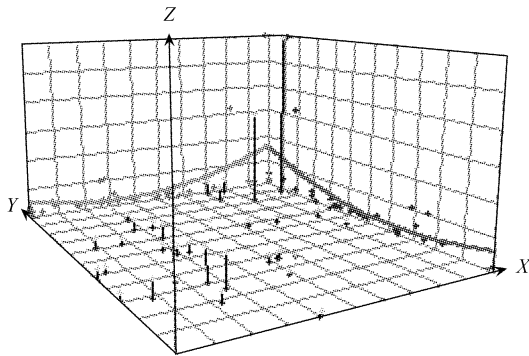


图 1 铁元素的空间分布趋势图
Fig.1 Trend analysis of iron

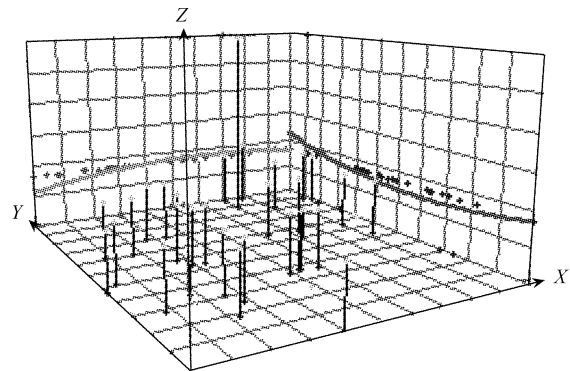


图 2 锰元素的空间分布趋势图
Fig.2 Trend analysis of manganese

2.3 半方差模型分析

根据 ArcGIS 9.0 软件地统计学模块下分隔距离和计算出的半方差,采用球状模型进行拟合,且考虑各向异性和二阶趋势效应,得到研究区地下水铁、锰含量半方差函数模型及其参数(表 3)。结果表明,研究区地下水铁、锰含量空间变异均具有各向异性特征,其中铁元素的长、短轴变程分别为 23.33 km 和 21.76 km,长轴方位角为 58°;锰元素的长、短轴变程分别为 23.32 km 和 17.11 km,长轴方位角为 66°,即铁、锰元素含量在东北——西南方向上均有比较明显空间变异。这与区域地势、地质结构和土壤母质有关,即该方向与区域地势的走向和土壤母质更替方向基本一致,整体来看区域地势东高西低,东北部主要分布第四系更新统冰碛物及冰水沉积物(Q_{2fgl}),而中、西部主要是白垩系上统夹关组(K_{2j})、灌口组(K_{2g}),下第三系名山群(K_{1-2mm})等紫色岩地层。块金值与基台值之比 $[C_0/(C_0 + C)]$ 可表示空间变异性程度(随机部分引起的空间变异性占系统总变异的比),如果该比值较高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大;相反,则由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大;如果该比值接近 1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素看, $C_0/(C_0 + C)$ 的比值可表示系统变量的空间相关性程度,比值小于 0.25,说明变量具有强烈的空间相关性;比值在 0.25 ~ 0.75,变量具有中等的空间相关性;大于 0.75,变量空间相关性很弱^[14,19]。铁、锰元素含量 $C_0/(C_0 + C)$ 值分别为 46.29% 和 41.47%,为中等强度的空间相关性,表明由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大。

表 3 地下水铁、锰含量半方差函数模型及参数

Table 3 The semivariogram model of iron and manganese content contents and its parameters

项目 Items	模型 Model	趋势阶数 Trend effect	变程 Range(km)		长轴方位角 Long axle azimuth (°)	块金 Nugget C_0	基台 Sill ($C_0 + C$)	块金/基台 $C_0/(C_0 + C)$ (%)
			长轴 Long axle	短轴 Short axle				
铁 Fe	Spherical model	2 阶 2-order	23.33	21.76	58	0.25	0.46	46.29
锰 Mn	Spherical model	2 阶 2-order	23.32	17.11	66	0.04	0.07	41.47

2.4 空间分布特征

2.4.1 铁元素空间分布特征

研究区浅层地下水中铁含量总体呈条带状或斑块状分布,呈现出从东北向西南逐渐降低的趋势。高值区 (>1.00 mg/L) 出现在东北的茅河乡、廖场乡一带,并以此中心以发散层状向西南地区逐渐降低。在西南部的名山县城附近地区也出现了一个较高值中心,并呈现出以 $0.50 \sim 1.00$ mg/L 区域为中心向四周逐层降低的趋势;中部与西北地区铁含量介于 $0.20 \sim 0.30$ mg/L, 总体含量较低;低值区 ($0.11 \sim 0.20$ mg/L) 出现在中南与南部地区(图 3)。

研究区浅层地下水铁元素空间分布特征主要与区域土壤母质、土壤类型和人为活动等因素关。①区域的东北部主要出露第四系更新统冰碛物及冰水沉积物 (Q_{2gl}), 其形成的黄壤由于风化成土作用较深, 土壤质地粘重, pH 较低, 土壤中大量的铁游离出来进入到地下水中从而导致了该区地下水较高的铁含量。实地土壤剖面挖掘观测, 在黄壤的心土层中可观察到较多铁锰网纹。而在区域的中部、西部及西南部主要出露白垩系夹关组 (K_{2j})、灌口组 (K_{2g}), 第三系名山群 (K_{1-2mm}) 等紫色岩, 其主要形成石灰性紫色土和中性紫色土。紫色土是一种幼年的土壤, 以物理风化为主, 化学风化弱, 土壤 pH 较高, 少有铁游离出来进入地下水, 因而地下水中铁含量相对较低。对紫色岩分布区域和第四系更新统冰碛物及冰水沉积物分布区域的样点进行统计分析, 结果表明两种母质区域地下水铁含量存在明显差异(图 4), 经两组独立样本的均值比较分析 (T 检验) 差异达显著水平 ($t_{(26,18)} = 2.626, P = 0.013$)。②土壤采样分析结果表明, 研究区两种主要土壤类型——紫色土和黄壤及其地下水铁含量存在明显差异, 经 T 检验, 黄壤土壤 pH 极显著低于紫色土, 而有效铁含量显著高于紫色土; 黄壤地下水铁含量也极显著高于紫色土(表 4)。相关分析结果表明, 地下水铁含量与土壤有效铁呈显著正相关关系 ($R = 0.42^*, n = 35$); 土壤有效铁与土壤 pH 呈极显著负相关关系 ($R = -0.76^{**}, n = 35$); 地下水铁含量与地下水 pH 呈显著负相关关系 ($R = -0.38^*, n = 35$)。③在西南部的名山县城附近地区地下水铁含量也相对较高, 这可能与工业、城市垃圾和废水排放等人为活动因素有关。名山县城污水采样分析结果表明, 铁含量为 (2.23 ± 1.22) mg/L ($n = 14$), 极显著高于研究区地下水铁含量 ($t_{(14,56)} = 5.78, P = 0.002$), 铁含量相对较高的污水渗漏进入地下水在一定程度上导致县城周围高铁地下水的形成。

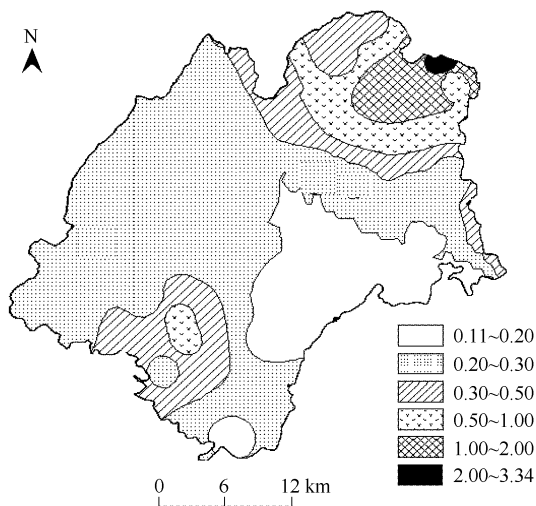


图 3 地下水铁含量等值线图

Fig. 3 Contour map of iron content (mg/L)

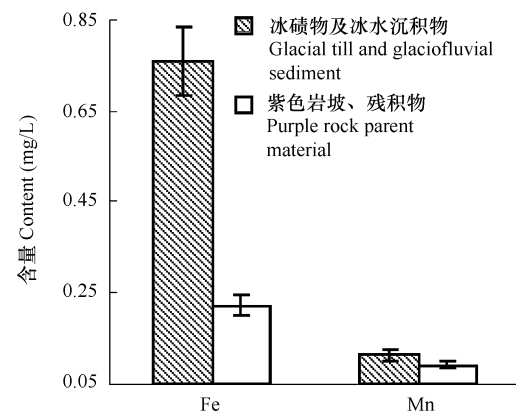


图 4 不同母质区域地下水铁、锰含量

Fig. 4 Iron and manganese contents in groundwater in different parent material

2.4.2 锰元素空间分布特征

研究区浅层地下水锰含量总体的空间分布特征基本与铁元素一致, 总体呈现出东北高西南低的趋势。这

主要是由于在地质作用过程中铁和锰有相似的迁移和富集规律^[20],相关分析表明,地下水铁、锰含量存在显著的正相关关系($R = 0.57^*$, $n = 56$)。锰含量高值区(0.18 ~ 0.23 mg/L)出现在东北部的茅河乡、廖场乡一带,并以该区为中心呈环状向西南逐渐降低,至名山县城附近地区又有所升高;在中部和西南部地下水的锰元素含量介于0.08 ~ 0.10 mg/L;锰含量低值区域(0.05 ~ 0.08 mg/L)出现在中南部的双河乡、车岭镇一带(图5)。所有的区域均未超过世界卫生组织规定的生活饮用水水质标准(0.4 mg/L)。

研究区浅层地下水锰含量总体的空间分布特征亦主要土壤母质、土壤类型和人为活动等因素有关。①统计结果表明,在四系更新统冰碛物和冰水沉积物母质分布区域,地下水中锰含量较高,而在紫色岩母质分布区域,地下水锰含量相对较低(图4),经两组独立样本的均值比较分析(T 检验),差异达显著水平($t_{(26,18)} = 2.206$, $P = 0.034$)。②土壤采样分析结果表明,黄壤有效锰含量显著高于紫色土;但地下水锰含量差异未达显著水平(表4)。相关分析结果表明,地下水锰含量与土壤有效锰呈显著正相关关系($R = 0.34^*$, $n = 35$);土壤有效锰与土壤pH呈显著负相关关系($R = -0.59^*$, $n = 35$);地下水锰含量与地下水pH呈负相关关系,但差异未达显著水平($R = -0.23$, $n = 35$)。③名山县城污水采样分析结果表明,锰含量分别为(0.26 ± 0.13) mg/L($n = 13$),显著高于研究区地下水锰含量($t_{(26,18)} = 3.206$, $P = 0.017$),锰含量相对较高的污水渗漏进入地下水在一定程度上导致县城周围高锰地下水的形成。

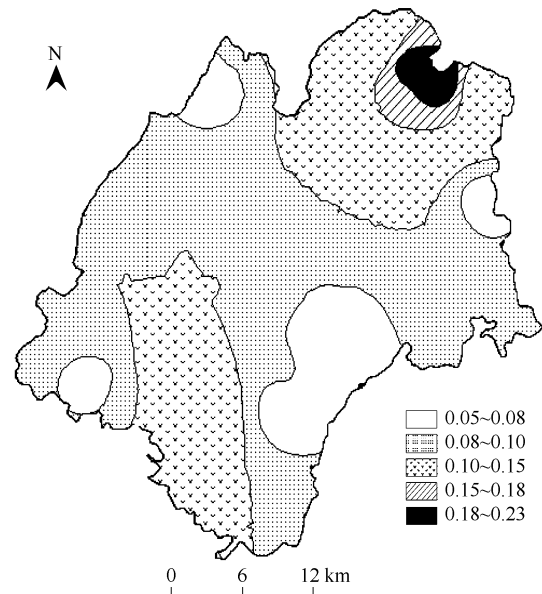


图5 地下水锰含量等值线图(mg/L)

Fig. 5 Contour map of manganese content (mg/L)

表4 不同土壤类型地下水铁、锰含量

Table 4 Iron and manganese contents in groundwater in different soil

土壤类型 Type of soil	样本数 Sampling No.	土壤 Soil			地下水 Groundwater		
		pH	有效铁 Available Fe (mg/kg)	有效锰 Available Mn (mg/kg)	pH	铁含量 Fe content (mg/L)	锰含量 Mn contents (mg/L)
紫色土 Purple soil	20	7.4 ± 1.1	22.31 ± 8.42	6.50 ± 1.42	7.1 ± 0.12	0.32 ± 0.10	0.09 ± 0.02
黄壤 Yellow soil	15	5.7 ± 0.8	80.33 ± 23.44	21.21 ± 7.52	6.8 ± 0.9	0.82 ± 1.08	0.12 ± 0.04
<i>F</i> 值 <i>F</i> value		11.89**	7.23**	6.01*	1.75	6.84*	2.25

3 结论

(1) 研究表明,研究区浅层地下水中铁含量介于0.11 ~ 3.34 mg/L,平均值为0.27 mg/L,总体水平较高,42.86%的样点未达到欧盟生活饮用水水质标准(<0.2 mg/L),25%的样点未达到我国和美国生活饮用水水质标准(<0.3 mg/L);区域东北部的茅河、廖场等乡镇超标严重,其中最大值达3.34 mg/L,远超过生活饮用水水质标准,对于该区于应加强生活饮用水水质监测和处理。研究区浅层地下水中锰含量介于0.05 ~ 0.23 mg/L,平均值为0.10 mg/L,总体水平较低,94.64%的样点达到我国生活饮用水水质标准(<0.1 mg/L),所有的样点达到世界卫生组织规定的生活饮用水水质标准(<0.4 mg/L)。

(2) 研究区浅层地下水中铁、锰含量在东西方向和南北方向均呈现二阶趋势效应,由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大。铁、锰含量空间分布特征基本一致,高值区出现在东北部茅河乡、廖场乡一带,低值区出现在中南部的双河乡、车岭镇一带,均呈现出从东北向西南逐渐降低,至名山县城附近又有所上升的趋

势。研究区浅层地下水中铁、锰含量分布的总体特征与区域土壤母质、土壤类型、人为活动等因素密切相关,第四系更新统冰碛物及冰水沉积物分布区域地下水含量显著高于紫色岩分布区域;黄壤下的浅层地下水铁、锰含量显著高于紫色土。

References:

- [1] Miao J, Gao Q, Xu S L. Trace element selenium and correlation disease. Zhengzhou: Henan Medical University Press, 1998. 127—129.
- [2] Rebecca J S. Defining iron-deficiency anemia in public health terms; a time for reflection. *Journal of Nutrition*, 2001, 131: 565—567.
- [3] Lora L I, James M T, Maureen M B, *et al.* Iron supplementation in early childhood; health benefits and risks. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2006, 84(6): 1261—1276.
- [4] Leanne M Y, Jillian S P, Heather E C, *et al.* The effect of iron status on vascular health. *Vascular Medicine*, 2006, 11(2): 85—91.
- [5] Brittmari S. Manganese in health and disease. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1994, 60: 980—981.
- [6] Zhao L S. Present situation and tasks of drinking water safety in rural areas in China. *China Water Resources*, 2005, 19: 20—22.
- [7] Li J, Yue H, Wang J P, *et al.* Analysis of present condition of rural drinking water safety and countermeasures. *China Water Resources*, 2006, 11: 26—29.
- [8] Zhu J Q, Wang C H, LU X R, *et al.* An analysis of the occurrence and influence factors of Fe^{2+} and Mn^{2+} in the shallow groundwater in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006, (3): 20—37.
- [9] Zeng Z H. The background features and formation of chemical elements of groundwater in the area of the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 262—269.
- [10] Li X Y, Song D M, Xiao D L. The variability of groundwater mineralization in Minqin oasis. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 16(2): 320—327.
- [11] Li B G, Bai Y L, Hu K L, *et al.* Spatial variability and distribution of nitrate content of shallow groundwater in Huang-Huai-Hai Plain. *Engineering Science*, 2001, 3(4): 42—45.
- [12] Song L H. Dissolved iron in chalk groundwater from Norfolk, England. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1985, 18: 261—274.
- [13] Reiner G, Tove A, Lars L, *et al.* Phosphate sorption in aluminum- and iron-rich humus soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 77—86.
- [14] Massoth, G J, Baker E T, Lupton J E, *et al.* Temporal and spatial variability of hydrothermal manganese and iron at cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B3): 4905—4923.
- [15] Hyoe T, Kenshi K, Shoei I, *et al.* Spatial variability of iron in the surface water of the northwestern North Pacific Ocean. *Marine Chemistry*, 2004, 86: 139—157.
- [16] Dong W H, Liao Z Z, Zhu X Q, *et al.* Impact of human activities on spatial-temporal distribution of groundwater with high iron concentration in Harbin City. *Hydrology*, 2005, 6, 25(3): 15—19.
- [17] National Standard of People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water GB/T 5750-2006. Beijing: China Standard Publishing, 2007. 4.
- [18] National Standard of People's Republic of China. Standard for drinking water quality GB 5749-2006. Beijing: China Standard Publishing, 2007. 4.
- [19] Huang Y Fang, Zhou Z Yu, Yuan X Y, *et al.* Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2041—2047.
- [20] Jiang Y Z, Yu G, Liang W J, *et al.* Correlations of exchangeable Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn in cultivated soils. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 160—63.

参考文献:

- [1] 苗健,高琦,许思来.微量元素与相关疾病.郑州:河南医科大学出版社,1998.127~129.
- [6] 赵乐诗.我国农村饮水安全现状及任务.中国水利,2005,19:20~22.
- [7] 李晶,岳恒,王建平,等.农村饮水安全现状分析及解决对策.中国水利,2006,11:26~29.
- [8] 朱锦旗,王彩会,陆徐荣,等.苏锡常地区浅层地下水铁锰离子分布规律及成因分析.水文地质工程地质,2006,(3):20~37.
- [9] 曾昭华.长江中下游地区地下水中化学元素的背景特征及形成.地质学报,1996,70(3):262~269
- [10] 李小玉,宋冬梅,肖笃宁.石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异.地理学报,2005,16(2):320~327.
- [11] 李保国,白由路,胡克林,等.黄淮海平原浅层地下水中 NO_3^- -N 含量的空间变异与分布特征.中国工程科学,2001,3(4):42~45.
- [16] 董维红,廖资生,朱雪芹,等.人类活动对哈尔滨市高铁地下水时空分布的影响.水文,2005,6,25(3):15~19.
- [17] 中华人民共和国国家标准.生活饮用水标准检验法 GB/T 5750-2006.北京:中国标准出版社,2007.4.
- [18] 中华人民共和国国家标准.生活饮用水卫生标准 GB 5749-2006.北京:中国标准出版社,2007.4.
- [19] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等.干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征.生态学报,2004,24(12):2773~2781.
- [20] 姜勇,张玉革,梁文举,等.耕地土壤中交换态钙镁铁锰铜锌相关关系研究.生态环境,2003,12(2):160~163.