

# 呼伦贝尔高原地下水氟分布特征 及其开发利用建议

李旭光 王长琪 郭常来 蔡 贺

(中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 本文通过对呼伦贝尔高原地下水中氟、TDS 等元素的分布规律及相关分析, 探讨了其地下水化学特征。采用灰色聚类模型分析, 进行饮水安全评价。根据该区地下水中氟、TDS 含量分布情况和饮水安全评价结果, 提出了地下水开发利用区划建议。

**关键词:** 呼伦贝尔高原; 高氟、高矿化度; 分布规律; 开发利用

**中图分类号:** P641.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2010)03-0665-07

## 1 区内概况

呼伦贝尔高原大部分地区属于温带大陆性半干旱气候, 北部属于寒温带大陆性季风气候。春季较干旱而多大风, 夏季凉爽湿润而短促, 秋季雨多霜冻降临较早, 冬季冰天雪地严寒漫长。热昼夜温差大, 有效积温利用率高, 无霜期短, 日照丰富, 降水量不多, 降水期多集中在 7—8 月。

区内河流湖泊众多, 有额尔古纳河、克鲁伦河、辉河、乌尔逊河、莫尔格勒河及呼伦湖等较大河流、湖泊, 除克鲁伦河外, 多属嫩江水系和额尔古纳河水系。

呼伦贝尔高原位于大兴安岭西侧, 为山地和丘陵所环抱。东部与东南部地势较高, 为中低山丘陵地带, 海拔多在 700~1000 m 以上。中部为波状起伏的呼伦贝尔(海拉尔)台地高平原, 位于中低山丘陵地带西南。一直延伸到呼伦湖东岸。地势东高西低。高平原中有 3 条大沙带和零星沙丘堆积。

## 2 研究区水文地质条件

呼伦贝尔高平原区地下水主要分为 3 个类型(图 1): 松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水和基

岩裂隙水。

松散岩类孔隙水主要分布大兴安岭以西的海拉尔河中下游、伊敏河、额尔古纳河的河谷平原中, 为冰水砂砾石孔隙潜水; 碎屑岩类裂隙孔隙水分布于高平原中辉河与伊敏河之间及呼伦湖以西的局部地区, 在辉河以西、呼伦湖以东有部分区间有分布, 含水层岩性为古近—新近系、白垩系河湖相砂砾岩、砂岩及煤层等构成; 基岩裂隙水分布于呼伦贝尔高原。

低山丘陵区。含水层由古生界变质岩、火山岩; 中生界火山岩、火山碎屑岩及燕山期花岗岩组成。

呼伦贝尔高平原上的潜水分布不连续, 主要分布在河谷中。在满洲里地区, 由于溶解、淋滤作用, 局部低洼地区径流条件差, 水化学类型为  $\text{HCO}_3-\text{Na}$  或  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Na}$  型, 矿化度一般小于 1 g/L。在海拉尔盆地和伊敏河河谷等地, 含水层由透水良好的砂砾石组成, 地表水、地下水径流畅通, 交替作用强烈, 以溶滤作用为主, 不利于富集盐分, 水化学类型为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型或  $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Ca}$  型, 矿化度小于 1 g/L。

在呼伦湖漫滩及克鲁伦河西侧地区, 由于地形较为平坦, 切割微弱, 地下径流缓慢, 以蒸发浓缩作用为主, 利于水中各种盐分富集。水化学类型为

收稿日期: 2010-02-01; 改回日期: 2010-04-12

基金项目: 东北地方病严重区地下水勘查及供水安全示范项目(1212010634701)资助。

作者简介: 李旭光, 男, 1982 年生, 助理工程师, 从事水文地质环境地质研究; E-mail: john2011@163.com。

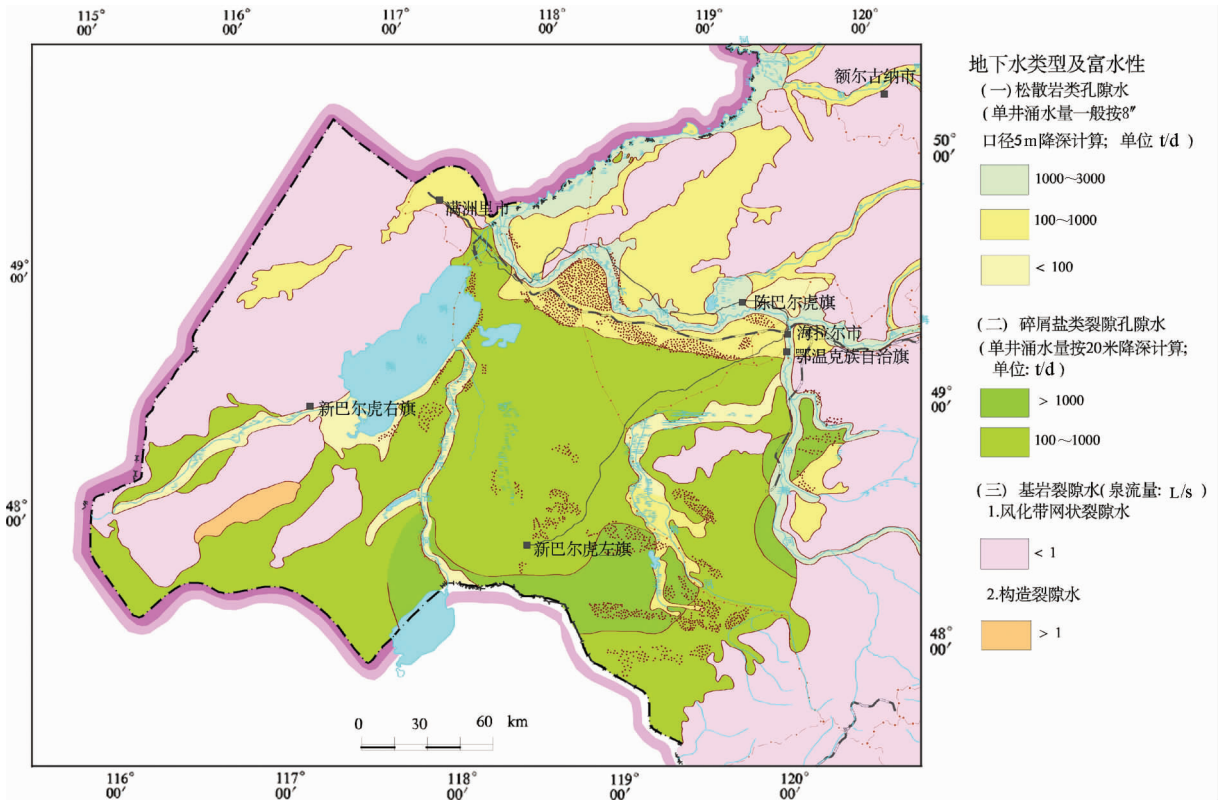


图1 呼伦贝尔高原水文地质简图

Fig.1 Simplified hydrogeological map of Hulun Buir plateau

$\text{HCO}_3\text{-Na}$  或  $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$  型为主,矿化度大于 1 g/L。且新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗氟含量均大于 1 g/L。

### 3 地下水中氟的分布特征

呼伦贝尔高原高氟地下水主要分布在潜水含水层中,地下水中氟超标检出率为 50.0%,平均值高达 1.12 mg/L,最高值达 2.8 mg/L。在承压水含水层中,虽然,氟含量最大偏高,超标检出率为 30.0%,但平均值略低于标准值,最高值为 2.54 mg/L,总体上看水质略优于潜水(表 1)。

海拉尔河流域及辉河流域附近氟含量较低,氟含量小于 1 mg/L。新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗境内呼伦湖以西、西南、南部,氟含量普遍较高,新巴尔虎右旗附近出现最高值,在 2.8 mg/L,其他地区分布相对均一,在 1.5 mg/L 左右。

在承压水含水层中,高氟区主要分布在呼伦湖东南部漫滩及新巴尔虎右旗至新巴尔虎左旗一带。

表 1 呼伦贝尔高原地区不同类型地下水氟含量及分布  
Table 1 Fluorine content and distribution in different types of groundwater in Hulun Buir Grassland

地下水类型	范围值 (mg/L)	平均值 (mg/L)	标准值 (mg/L)
潜水	0.05~2.8	1.12	1.0
承压水	0.47~2.54	0.91	1.0

新巴尔虎右旗氟含量为 2~4 mg/L,呼伦湖东部至新巴尔虎左旗氟含量 1~2 mg/L,在新巴尔虎右旗氟含量最高达 2.54 mg/L。

根据地下水中氟的分布、地质与水文地质条件推测本区氟的来源主要是含氟的岩石风化。各类岩石中,以酸性岩浆岩平均含氟较高为 800 mg/kg,中性岩浆岩和沉积岩次之,约 500 mg/kg。基性及超基性岩浆岩较低,各为 370 mg/kg 及 100 mg/kg。随岩浆岩中  $\text{SiO}_2$  含量的减少,氟的含量也减少<sup>[1]</sup>。本区的火山岩较为发育,尤其是以酸性花岗岩类更为明显,

在呼伦湖以西及西南部分布广泛,在海拉尔河、辉河沿岸也间有分布,局部揭露。

通过大气降水渗入基岩裂隙后溶滤母岩化学成分,而后以径流的方式沿裂隙向下运移。由于山区地形切割剧烈,水文网发育,从而构成排泄地下水的通道。大部分地下水经短暂的径流就在沟头谷坡以泉的形式排出地表,注入河流。但是在河谷平原局部地区由于湖积洼地地下水含水层中颗粒细物质较多,透水性较弱,地下径流及水交替滞缓,强烈的蒸发浓缩作用,致使地下水中氟离子富集,形成高氟区。

### 4 氟离子与其他水化学组分的相关性

利用 SPSS 软件相关分析模块中的单相关分析

模块,定量分析了地下水中  $F^-$  与  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $TFe$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、总硬度、PH、TDS 的相关关系,得出结论呼伦贝尔高原高氟区  $F^-$  与  $Na^+$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、TDS 呈正相关关系,相关系数分别为 0.650、0.576、0.564、0.662,  $F^-$  与 TDS 相关系数最大,说明在研究区内  $F^-$  的分布与 TDS 的分布有必然联系。而  $F^-$  与其他离子均未表现出明显的相关关系。

$F^-$  与  $Na^+$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、TDS 等值线图 (图 2~6) 显示:在研究区  $F^-$  离子与  $Na^+$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、TDS 最高值均出现在新巴尔虎右旗西南,也就是说当氟离子出现高值时,钠、重碳酸根、氯离子及矿化度也出现高值。因此,氟离子与钠、重碳酸根、氯离子及矿化度呈正相关性。同时可以看出氟离子在新巴尔虎左

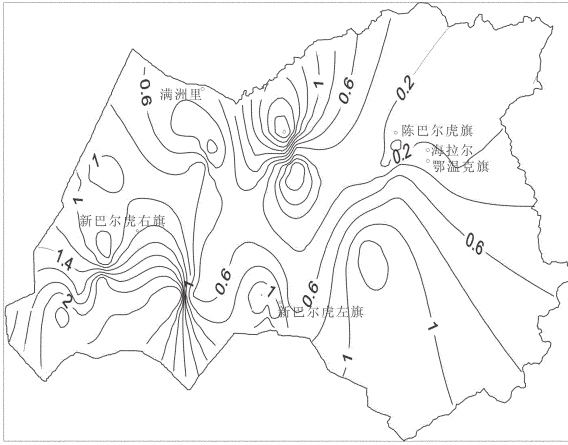


图 2 地下水中氟离子含量等值线

Fig.2 Contour lines of fluorine ion content in groundwater

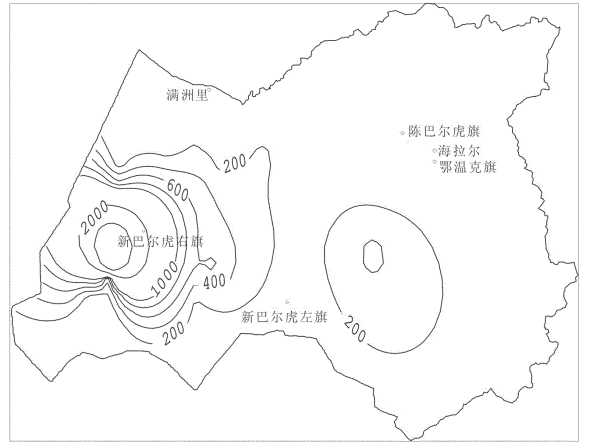


图 3 地下水中钠离子含量等值线

Fig.3 Contour lines of sodium ion content in groundwater

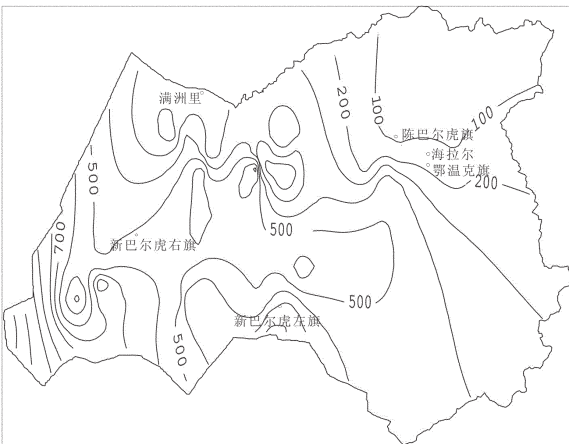


图 4 地下水中重碳酸根离子等值线

Fig.4 Contour lines of bicarbonate root ion content in groundwater

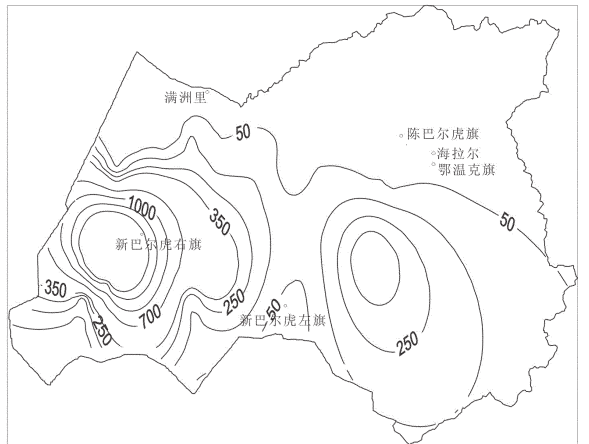


图 5 地下水中氯离子含量等值线

Fig.5 Contour lines of chlorine ion content in groundwater

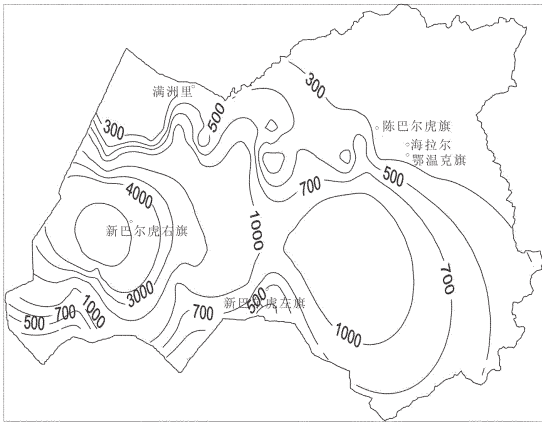


图 6 地下水中 TDS 含量等值线

Fig.6 Contour lines of TDS content in groundwater

旗、新巴尔虎右旗地区的呼伦湖西南克鲁伦河流域及呼伦湖漫滩区地下水中较发育。

### 5 开发利用区划

为了查明全区的地下水水质情况，保障饮水安全，对呼伦贝尔高原地区进行地下水饮水安全评价。应用了地下水样测试数据，采用灰色聚类模型进行饮水安全评价。最后根据该区的地下水中氟、TDS 含量分布情况和饮水安全评价结果，进行饮水安全区划。

#### 5.1 原理和计算步骤

灰色聚类是将聚类对象于不同聚类指标所拥有的白化数，按几个灰类进行归纳，以判断该聚类对象属于哪一类。

灰色聚类计算步骤如下：

①给出聚类白化数  $d_{ij}$  并确定灰类白化函数  $f_{jk}(x)$

水样点记为 1#, 2#, 3#, ..., 并以  $i$  表示，称此为聚类对象。测试指标以  $j=1, 2, 3, \dots$  表示，称之为聚类指标。水质评价等级则以  $k=I, II, III, \dots$  表示，称为聚类灰数。记  $d_{ij}$  为聚类白化数，表示第  $i$  个水样第  $j$  种测试指标的实测值。

参照国家规定的水质分级标准并结合当地实际情况，若将水质分为  $p$  级，则有  $p$  个灰类。然后按聚类指标所属类别，确定出不同的白化函数。

第 1 类(第 1 级水)对于第  $j$  个指标规定的白化函数为：

$$f_{j1}(d) = \begin{cases} 1 & d \in [0, \lambda_{j1}) \\ \frac{\lambda_{j2} - d}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} & d \in [\lambda_{j1}, \lambda_{j2}) \\ 0 & d \in [\lambda_{j1}, \infty) \end{cases} \quad (1)$$

第  $k$  类(第  $k$  级水,  $k=2, 3, \dots, p-1$ )对于第  $j$  个指标规定的白化函数为：

$$f_{j1}(d) = \begin{cases} \frac{d - \lambda_{j,k-1}}{\lambda_{j,k} - \lambda_{j,k-1}} & d \in [\lambda_{j,k-1}, \lambda_{j,k}) \\ \frac{\lambda_{j,k+1} - d}{\lambda_{j,k+1} - \lambda_{j,k}} & d \in [\lambda_{j,k}, \lambda_{j,k+1}) \\ 0 & d \notin [\lambda_{j-1}, \lambda_{j,k+1}) \end{cases} \quad (2)$$

第  $p$  类(第  $p$  级水)对于第  $j$  个指标规定的白化函数为：

$$f_{j1}(d) = \begin{cases} 0 & d \in [0, \lambda_{j,k-1}) \\ \frac{d - \lambda_{j,k-1}}{\lambda_{j,k} - \lambda_{j,k-1}} & d \in [\lambda_{j,k-1}, \lambda_{j,k}) \\ 0 & d \in [\lambda_{j,k}, \lambda_{j,k+1}) \\ 1 & d \in [\lambda_{j,k}, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

#### ②标准聚类权 $\eta_{kj}$ 的确定

聚类权是衡量各个指标对同一灰类的权重。在水质评价中，由于各聚类指标的单位不同，且某些指标的绝对值相差很大，因而不能直接进行计算，必须事先对灰类进行无量纲化处理。对应于不同的水质指标，可分为 2 种情况：对数值愈大污染愈重的指标，例如酚、亚硝氮等，其计算式为  $r_{kj} = S_{kj} / \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p S_{kj}$ ；而对于数值愈大污染愈轻的指标，例如溶解氧等，其计算式为  $r_{kj} = \frac{1}{S_{kj}} / \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \frac{1}{S_{kj}}$ ；其中  $S_{kj}$  为第  $j$  个指标第  $k$  个灰类(级别)的灰数(标准值)， $r_{kj}$  为其无量纲数。然后，采用下式计算标准聚类权：

$$\eta_{kj} = r_{kj} / \sum_{j=1}^m r_{kj} \quad (4)$$

式中  $\eta_{kj}$  为第  $j$  个测试指标第  $k$  个灰类的权重。从式(4)中可以看出，聚类标准权即为水质分级标准中各个污染因子在某一污染等级中所占的权重。

#### ③聚类系数的计算

聚类系数是通过灰类白化函数的生成而得到的，它反映了聚类样本对灰类的亲疏程度，其计算式为：

$$\sigma_{kj} = \sum_{j=1}^m f_{kj}(d_{ij}) \eta_{kj} \quad (5)$$

式中  $\sigma_{kj}$  为第  $i$  个样本关于第  $k$  个灰类的聚类系数。式(5)表明,对于任何一个监测点,  $\sigma_{kj}$  表示各个污染因子对水体质量的共同影响结果在某一评价等级中所占的权重。其中某一污染因子的白化程度由给定的  $f_{jk}(x)$  求得。这样,便可构造聚类行向量。

$$\sigma(i) = \{ \sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{im} \}$$

#### ④ 聚类

按最大隶属原则,若  $\sigma_{hi} = \max_{1 \leq h \leq p} (\sigma_{kj})$ , 则  $\sigma_{hi}$  所对应的灰类  $h$  为此样本所属的类别。把各个样本同属的灰类进行归纳,即是灰色聚类的结果。至此,就能将各水样点所属水质级别判断出来,同一水质级别的水样点归为一类。

#### ⑤ 饮水安全评价

现将采样点作为聚类对象 ( $i=1, 2, \dots, 12$ ); 9 项评价因子作为聚类指标 ( $j=1, 2, \dots, 12$ ),  $d_{ij}$  为第  $i$  个采样点的第  $j$  个污染指标的样本值,对地下水进行水质评价。

确定白化函数:以中华人民共和国国家标准地下水质量标准 GB/T14848-9 作为水质标准,将水质分为 5 级,即 5 个灰类 ( $k=1, 2, \dots, 5$ )。选用表 2 中不同指标的分级标准值作为各灰类白化函数的阈值  $\lambda_{j,k}$ ,依据式(1)~(3)构造各指标白化函数。

### 5.2 灰色聚类权值确定

由于各聚类指标的量纲不同且数值差别较大,因此需先作无量纲化处理,然后按式(4)计算灰色聚

类权值,计算结果如表 3 所示。

求灰色聚类系数  $\sigma_{kj}$  及灰色聚类矩阵  $\sigma_c$

$$\text{灰色聚类系数: } \sigma_{kj} = \sum_{j=1}^m f_{kj}(d_{ij}) \eta_{kj} \quad (6)$$

依据上式计算各水样对应的灰色聚类系数。

判断聚类对象所属灰类

按  $\sigma_{kj} = \max_{1 \leq h \leq p} (\sigma_{kj})$  划分水质类别,即  $\sigma_c$  在中由各行找出最大聚类系数,此最大聚类系数所属灰类即聚类对象  $i$ (测点)所属灰类(水质类别),根据聚类矩阵可判断各采样点的水质级别。

根据该区的地下水中氟、TDS 含量分布情况和饮水安全评价结果对呼伦贝尔高原区地下水开发进行区划(图 7),结果表明:在新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗地区的呼伦湖西南克鲁伦河流域、呼伦湖漫滩区、陈巴尔虎旗的西乌珠儿镇及陈巴尔虎旗完工农场附近的地下水水质较差,该地区受地质构造、地貌、气候等因素影响造成地下水中氟离子、矿化度、硫酸根、氯离子等元素超过生活饮用水标准值,均为 IV、V 类水,不利于开采使用。其他地区水质较好,均属 I、II、III 类水,符合居民用水及工农业、牧畜用水要求,可以分层开采。

## 6 结论与建议

(1)高氟地下水主要分布在潜水含水层中,在承压水含水层中,虽然,氟含量最大偏高,超标检出率较低,总体上看水质略优于潜水。

(2) $F^-$  与  $Na^+$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、TDS 相关性较大的指

表 2 地下水水质评价标准  
Table 2 Standard for groundwater quality evaluation

类别标准值项目	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
pH		6.5~8.5		5.5~6.5, 8.5~9	<5.5, >9
总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)(mg/L)	≤150	≤300	≤450	≤550	>550
溶解性总固体(mg/L)	≤300	≤500	≤1000	≤2000	>2000
硫酸盐(mg/L)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
氯化物(mg/L)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
铁(Fe)(mg/L)	≤0.1	≤0.2	≤0.3	≤1.5	>1.5
氨氮(NH <sub>4</sub> )(mg/L)	≤0.02	≤0.02	≤0.2	≤0.5	>0.5
氟化物(mg/L)	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤2.0	>2.0
硝酸盐(以 N 计)(mg/L)	≤2.0	≤5.0	≤20	≤30	>30

表3 灰色聚类权值  $\eta_{kj}$   
Table 3 Gray cluster weighted value

污染指标	灰类 k				
	I	II	III	IV	V
总硬度	0.223	0.244	0.197	0.014	0.132
溶解性总固体	0.115	0.105	0.113	0.141	0.124
硫酸盐	0.097	0.159	0.143	0.125	0.110
氯化物	0.097	0.159	0.143	0.125	0.110
铁(Fe)	0.062	0.068	0.055	0.171	0.150
氨氮(NH4)	0.036	0.020	0.106	0.165	0.146
氟化物	0.319	0.174	0.094	0.117	0.103
硝酸盐	0.051	0.070	0.151	0.141	0.124

标在研究区的分布范围，直观的反映出研究区地下水中 F<sup>-</sup>及 TDS 等离子超标范围区域，其中氟离子在新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗地区的呼伦湖西南克鲁伦河流域及呼伦湖漫滩区地下水中较发育，陈

巴尔虎旗的西乌珠儿镇及陈巴尔虎旗完工农场附近。

(3)通过对呼伦贝尔高原地下水水化学特征及高氟地下水的成因及分布特征的分析得出：在呼伦湖漫滩区及克鲁伦河流域出现高氟现象主要原因是河谷平原两侧有高氟岩体，经降水溶滤作用将氟离子通过地下径流方式补给到河谷平原区，由于地形较为平坦，切割微弱，地下径流缓慢，以蒸发浓缩作用为主，利于水中各种盐分富集，所以形成高氟地下水；而在海拉尔盆地和伊敏河河谷等地，虽然地形较低，但地表水系发育，含水层由透水良好的砂砾石组成，地表水、地下水径流畅通，交替作用强烈，以溶滤作用为主，不利于富集盐分。

(4)采用灰色聚类模型对呼伦贝尔高原地区进行地下水进行饮水安全评价。最后根据该区的地下水中氟、TDS 含量分布情况和饮水安全评价结果显示，在新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗地区的呼伦湖西南克鲁伦河流域、呼伦湖漫滩区、陈巴尔虎旗的西乌

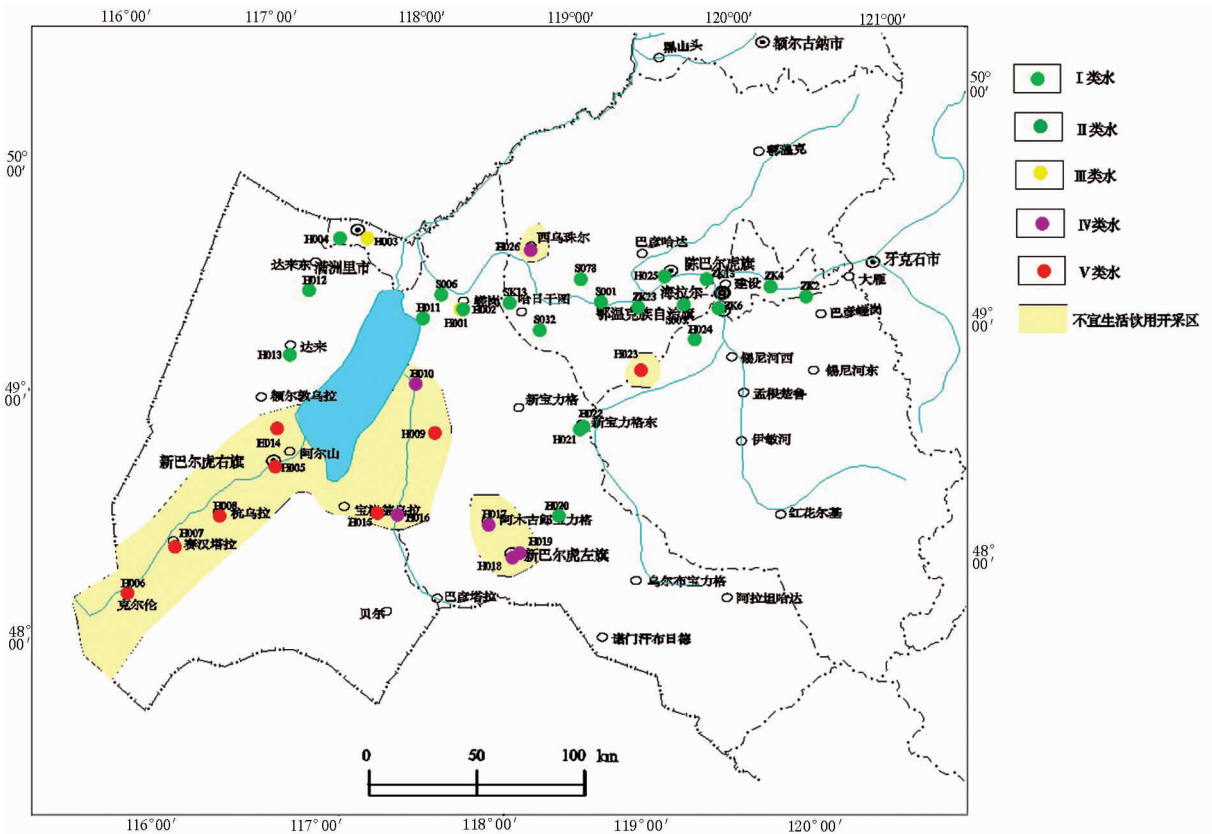


图7 呼伦贝尔高原地区地下水开发区划

Fig.7 Regionalization of groundwater exploitation in Hulun Buir plateau

珠儿镇及陈巴尔虎旗完工农场附近的地下水水质较差,均为Ⅳ、Ⅴ类水。其他地区水质较好,均属Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、类水,符合居民用水及工农业、牧畜用水要求,可以分层开采。但在开采时要坚持可持续发展原则,需分层止水,逐步开采使用,尽量减少各含水层的连通。

### 参考文献 (References):

[1] 陈国阶, 余大富. 环境中的氟[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 64-83.  
Chen Guojie, She Dafu. The Fluorine in Environment[M]. Beijing: Science Press, 1990: 64-83(in Chinese with English abstract).

[2] 王双合. 用灰色聚类法对石羊河下游水环境质量的的评价 [J]. 甘肃水利水电技术, 2000, 1: 59-63.  
Wang Shuanghe. Using the grey cluster analysis method to evaluate the water quality of Shiyang River downstream [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2000, 1: 59-63 (in Chinese).

[3] 高健磊, 吴泽宁, 左其亭. 水资源保护规划理论方法与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 97-103.  
Gao Jianlei, Wu Zening, Zuo Qiting. The Theory Method and Practice of Water Resources Protection Plans [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002: 97-103 (in Chinese with English abstract).

## Fluorine distribution characteristics of groundwater in Hulun Buir plateau and some suggestions for groundwater exploitation and application

LI Xu-guang, WANG Chang-qi, GUO Chang-lai, CAI He

(Shenyang Geological Survey Center, CGS, Shenyang 110034, Liaoning, China)

**Abstract:** This paper deals with the distribution regularity of fluorine and TDS in groundwater of Hulun Buir plateau, and probes into chemical characteristics of groundwater. Using special methods, the authors evaluated the safety of potable water. According to the distribution regularity of fluorine and TDS in groundwater and the results of the safety evaluation of potable water, the authors put forward some suggestions for the exploitation and application of groundwater.

**Key words:** Hulun Buir plateau; high fluorine; high salinity; distribution regularity; exploitation and application

**About the first author:** LI Xu-guang, male, born in 1982, assistant engineer, engages in the study of hydrogeology and environmental geology; E-mail: john2011@163.com.