

# 古尔班通古特沙漠地下水水质现状及变化趋势分析

魏征<sup>1</sup>, 吴彬<sup>1</sup>, 侯利军<sup>2</sup>, 杜明亮<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 陕西省宝鸡市勘察测绘院, 陕西宝鸡 721099)

**摘要:** 采用熵权集对分析法和趋势回归分析法, 选取总硬度、总溶解性固体、硫酸盐、氟化物等评价指标, 对新疆沙漠区某水源地水质现状评价及变化趋势进行了分析。结果表明: 该水源地大部分机井水质为Ⅲ类, 极个别机井为Ⅴ类。利用线性回归分析发现, 近10年来总硬度、总溶解性固体及氟化物含量有升高趋势, 其余指标变化不大。结合当地水文地质条件, 分析认为, 影响地下水环境的因素是超采地下水和蒸发作用及氧化还原反应。

**关键词:** 水质评价; 地下水; 集对分析; 熵权; 沙漠地区

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)04-0175-05

## Analysis of groundwater quality status and change trend in Gurbantungut desert

WEI Zheng<sup>1</sup>, WU Bin<sup>1</sup>, HOU Lijun<sup>2</sup>, DU Mingliang<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Institute of Survey and Mapping of Baoji in Shaanxi, Baoji 721099, China)

**Abstract:** According to the theory of set pair analysis and trend regression analysis, the paper selected the indexes such as total hardness, total dissolved solids, sulfate and fluoride to analyze the water quality status and variation trend in desert area of Xinjiang. The results show that the water quality of majority water wells are class III, few of them are class V. Through linear regression analysis it is found that in recent 10 years the total hardness, total dissolved solids and fluoride content tend to increase, and the remaining indicators changes little. Taking the local hydrogeological conditions into account, it is believed that the factors which influence groundwater environment are over exploitation of groundwater and evaporation and oxidation reduction reaction.

**Key words:** evaluation of water quality; groundwater; set pair analysis; entropy weight; desert region

## 1 研究背景

地下水水质评价是地下水资源评价与保护的一项重要内容, 如何客观准确的评价地下水水质是地下水资源研究的一个重点。地下水水质评价方法有很多, 目前常用的评价方法有模糊综合评价法、灰色系统法、神经网络模型等<sup>[1-3]</sup>。集对分析法<sup>[4]</sup>是赵克勤在1989年提出来的一种方法, 其核心思想就是把确定性和不确定性系统地结合起来, 确定性和不确定性在一定条件下转化, 相互制约, 相互影响, 从而把对不确定性的辩证认识转换成一个具体的数学工具<sup>[5-6]</sup>。本文采用的熵权集对分析法, 是一种合理有效有序的评价方法, 它通过引入信息熵的概念,

来确定个评价指标在总评价中所占的平均权重, 并不是属于一票否决的, 使得在分配权重的问题上有了理论依据。

趋势研究就是指某一变量在一段时间内的观测值是否随时间变化, 是环境评价的重要内容之一。水质变化趋势分析目前存在两方面的困难, 一是观测资料是否具有广泛性、一致性、代表性, 二是获取的资料的变化趋势是否可靠。本文采用的回归趋势分析是应用极为广泛的数据参数检验分析方法之一, 它可以从数据和时间的关系图中看出水质参数的变化<sup>[7]</sup>。

古尔班通古特位于新疆准噶尔盆地, 为中国第二大沙漠, 面积4.88万km<sup>2</sup>, 全年降水量稀少, 蒸发强度大, 没有地表径流。沙漠以固定和半固定沙丘为

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272277); 新疆水文学及水资源重点学科基金项目(xjswszzyzdxk20101202)

作者简介: 魏征(1989-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区地下水资源利用。

通讯作者: 吴彬(1972-), 男, 甘肃陇西人, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 干旱区地下水资源利用与保护。

主,固定沙丘上植被覆盖率为50%,半固定沙丘为20%。本文以某水源地为研究对象,该水源地为生产用水水源地,依据10年地下水资料,重点研究沙漠地区地下水变化趋势,对于认识沙漠干旱地区地下水环境特征有重要帮助。分析地下水环境,研究地下水变化趋势,对保护地下水资源尤为重要,特别是遭到人类活动影响严重、生态系统脆弱的干旱地区。

## 2 评价地下水水质的改进集对分析法

### 2.1 集对分析法原理

集对分析的基本思路是:在一定的背景背景下,对所论两个集合所具有的特性作同异反分析并加以度量刻画,得出这两个集合在所论背景下的同异反联系度表达式,联系度的确定是决策结果可信的关键。通过联系度的引入,可将该思想做具体的数学运算。联系度可用如下公式表示:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N} = a + bi + cj \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为联系度, $S/N$ 为集合A与集合B的同一度,简记为 $a$ ;  $F/N$ 为差异度,简记为 $b$ ;  $P/N$ 为对立度,简记为 $c$ ;  $i$ 为差异标记,在 $[-1, 1]$ 区间视不同情况取值, $i$ 也可仅起标记作用; $j$ 为对立度系数,其值为 $-1$ , $j$ 同样也可仅起标记作用。

本文采用五元联系度集对分析法,根据水质评价标准中的五级分类,将各个评价指标与评价标准构成一个集对,通过联系度比较,来确定最终评价结果。五元联系度的表达式为:

$$\mu = a + bi + cj + dk + el \quad (2)$$

式中: $a, b, c, d, e$ 为联系分量分别代表评价样本与水质 I ~ V 级标准的联系分量且满足归一化条件,即 $a + b + c + d + e = 1$ , $i, j, k, l$ 仅做标记使用。

水质评价的指标分为越小越优型和越大越优型,在水质评价中一般选择越小越优型。每个实测值相对于评价标准的联系度表达式为:

$$\mu_{mk} = \begin{cases} 1 + 0i + 0j + 0k + 0l & x \in [0, S_1] \\ \frac{S_2 - x}{S_2 - S_1} + \frac{x - S_1}{S_2 - S_1}i + 0j + 0k + 0l & x \in [S_1, S_2] \\ 0 + \frac{S_3 - x}{S_3 - S_2}i + \frac{x - S_2}{S_3 - S_2}j + 0k + 0l & x \in [S_2, S_3] \\ 0 + 0i + \frac{S_4 - x}{S_4 - S_3}j + \frac{x - S_3}{S_4 - S_3}k + 0l & x \in [S_3, S_4] \\ 0 + 0i + 0j + 0k + 1l & x \in [S_4, +\infty] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_1, S_2, S_3, S_4$ 分别为不同评价指标的标准限值; $x$ 为各评价指标的实测值; $m$ 为评价样本序号; $k$

为评价指标序号。

### 2.2 熵值法确定权重的系数

水质评价是一种多指标评价体系,在现有的应用集对分析法评价中,各项指标均取平均权重,未考虑到不同评价指标的相对重要性,使最终得出的结果受到影响。在信息论中,熵值反映了信息的无序化程度,可以用来度量信息量的大小,一个系统越是有序,信息熵就越低,反之,一个系统越是混乱,信息熵就越高,如果指标的信息熵越小,表示该指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用理当越大,权重就应该越高。其主要计算步骤如下:

(1) 假定有 $m$ 个评价对象,每个评价对象有 $n$ 个评价指标,构建判断矩阵 $R$ :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: $r_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的第 $j$ 个评价指标的实测值。

(2) 将判断矩阵 $R$ 归一化,得到归一化矩阵 $B$ , $B$ 的元素为:

$$b_{ij} = \frac{(r_{ij} - r_{\min})}{(r_{\max} - r_{\min})} \quad (5)$$

式中: $r_{\max}, r_{\min}$ 分别为同一指标下不同评价对象中最满意值和最不满意值(越大越满意或越小越满意)。

(3) 根据传统的熵概念定义各评价指标的熵为:

$$H_i = - \left( \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) / \ln m \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$f_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^m b_{ij} \quad (7)$$

显然当 $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 无意义,因此对 $f_{ij}$ 的计算加以修正:

$$f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1 + b_{ij}) \quad (8)$$

(4) 计算各评价指标的熵权 $W$ :

$$W = (\omega_j)_{1 \times n} \quad (9)$$

式中: $\omega_j = (1 - H_j) / (n - \sum_{j=1}^n H_j)$ ,且 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$

将各个指标的集对分析联系度与其相应的权重相乘,并将加权平均值作为平均联系度;加权平均联系度的计算公式为:

$$\mu_k = W \times R \quad (10)$$

式中: $\mu_k$ 为评价点 $i$ 相对于等级 $k$ 的加权平均联系度; $W$ 为各评价指标的权重向量 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j)$ ,且满足归一化条件 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ , $R$ 为根据式(3)计算出的水质分级联系度矩阵。

(5) 水质评价:

对于评价点  $i$ , 将最大加权平均联系度对应的等级作为该评价点最终的水质等级, 即:

$$\delta_i = \mu_{k(\max)} \quad (11)$$

式中:  $\delta_i$  为该评价点所属的水质级别。

### 3 实例研究

#### 3.1 水源地概况

水源地位于新疆准噶尔盆地东部, 地处沙漠区中心, 沙漠南北方向宽 20 km, 东西向两侧延伸出区外, 沙丘起伏, 连绵不断, 分布有沙垄、沙丘链、平砂地等、沼泽湿地及砾石戈壁斜坡几种形态的地貌。

研究区分布有孔隙潜水和承压水, 第四系承压水为主要供水目的层。第四系承压含水层厚度在平面上变化较大, 南北相差 5 倍, 东西相差 2.5 倍, 含水层厚度变化总的特点是: 东北薄, 西南厚。该区地下水补给主要还是来自东南方向的地下侧向径流, 由于处于沙漠地带, 主要是通过潜水蒸发排泄到大气中和人工开采, 少部分继续向北径流排泄。

通过从研究区多口供水井及观测孔来看, 水源地水位呈下降状态, 主要是水源地开采量增加引起的, 且开采目的层较浅, 造成承压水头降低, 减少了对浅水的顶托补给。水源地潜水水质很差, 属微咸水和咸水, 水化学类型为  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na} \cdot \text{K} \cdot \text{Cl}-\text{Na} \cdot \text{K}$  和  $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4-\text{Na} \cdot \text{K}$  型; 深层承压水水质较好, 水化学类型为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Na} + \text{K} \cdot \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3-\text{Na} + \text{K} \cdot \text{Ca}$  及  $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4-\text{Na} + \text{K}$  型。

#### 3.2 确定评价指标及分类等级

依据水源地地下水水质数据分析, 选定总硬度(以  $\text{CaCO}_3$  计)、总溶解性固体(以下简称矿化度)、氯化物、硫酸盐、氟化物 5 个评价指标, 采用熵权集对分析法为评价方法, 2011 年地下水水质测试结果见表 1。

表 1 水源地 2011 年地下水水质分析结果 mg/L

测井编号	总硬度	矿化度	氯化物	硫酸盐	氟化物
J1	122	425	112	84	0.7
J2	160.1	622.8	120.5	192.1	0.9
J3	135	456	98.3	167	1
J4	90.1	560	106.4	153.7	1.3
J5	50	310	42.5	86.5	0.6
J6	107	378	53.6	89	0.69
J7	61.4	407	85.5	45	0.73
J8	80.1	438.8	74.4	115.3	1.1
J9	158	552	108	87.6	0.24
J10	310.2	925.8	234	297.8	0.4

选取《地下水质量标准》(GB/T 14848 - 93) 为依据, 根据水质不同将其分为 5 个等级。

#### 3.3 评价结果与分析

以 J1 为例, 首先根据式(2) 计算出 5 项评价指标的水质分级的联系度为:

$$\mu_{J1, \text{总硬度}} = 1 + 0i + 0j + 0k + 0l,$$

$$\mu_{J1, \text{矿化度}} = 0.375 + 0.625i + 0j + 0k + 0l,$$

$$\mu_{J1, \text{Cl}^-} = 0.38 + 0.62 + 0j + 0k + 0l,$$

$$\mu_{J1, \text{SO}_4^{2-}} = 0.66 + 0.34i + 0j + 0k + 0l,$$

$$\mu_{J1, \text{F}^-} = 0 + 0.6i + 0.4j + 0k + 0l.$$

然后对 10 个样本依次按照式(4) ~ (9) 进行计算, 最后得出各评价指标的权重, 见表 2。

表 2 各评价指标权重

评价指标	总硬度	矿化度	氯化物	硫酸盐	氟化物
权重	0.2077	0.1981	0.1908	0.2077	0.1957

最后按照式(10) 计算出测点 J1 的最终的平均联系度  $\mu_{J1} = 0.49 + 0.43i + 0.08j + 0k + 0l$ 。

依据上述步骤, 可分别计算出其余各点的最终平均联系度, 详见表 3。

各测点水质从优到劣分别为: J5、J6、J7、J9、J1、J8、J4、J2、J3、J10。从总体来看, 水质结果较好, 大部分属于 II 类及以上水质, J10 水质较差, 各个评价指标含量较高, 硫酸盐含量即将达到 IV 类水质标准 (> 350 mg/L)。

表 3 水质评价结果

测井编号	a	b	c	d	e	水质等级
J1	0.49	0.43	0.08	0	0	I
J2	0.25	0.46	0.29	0	0	II
J3	0.35	0.42	0.23	0	0	II
J4	0.29	0.48	0.11	0.12	0	II
J5	0.72	0.24	0.04	0	0	I
J6	0.64	0.29	0.07	0	0	I
J7	0.63	0.28	0.09	0	0	I
J8	0.48	0.32	0.16	0.04	0	I
J9	0.58	0.40	0.02	0	0	I
J10	0.07	0.38	0.45	0.1	0	III

#### 3.4 综合评价结果

选用地下水水质分析标准中的综合评价法, 将监测结果与地下水质量级别相比较, 确定各类别单项组的  $F$  值。

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (12)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (13)$$

式中:  $F_i$  为各类别单项组评价分值, 其值见表4;  $F_{\max}$  为  $F_i$  中的最大值;  $\bar{F}$  为各单项组评分值  $F_i$  的平均值。

表4 各类别单项组评价分值

类别	I	II	III	IV	V
$F_i$	0	1	3	6	10

根据  $F$  值大小来确定地下水质量级别, 见表5。

表5 地下水质量级别

级别	优良	良好	较好	较差	极差
$F$	<0.80	0.80 ~ <2.50	2.50 ~ <4.25	4.25 ~ <7.20	>7.20

各测点综合水质评价结果见表6。

表6 水质综合评价结果

测井编号	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
$F$	2.28	3.96	2.41	12.66	7.60	2.40	2.24	3.88	2.34	7.70
水质等级	良好	较好	良好	极差	极差	良好	良好	较好	良好	极差

从综合评价结果来看, 总体的水质情况还是较好的, 但 J4、J5、J10 水质情况已经处于极差等级, 其中 J4 号测井水质最差, 得到的  $F$  值远大于极差等级的标准。

## 4 水源地地下水水质变化趋势及成因分析

### 4.1 地下水水质变化趋势

根据现有的10年监测井数据, 选取总硬度、溶解性固体、硫酸盐、氟化物4种元素含量进行分析, 采取一元线性回归分析, 求出不同监测井不同元素含量的变化趋势, 并与季节性 Kendall 检验法进行对比检验<sup>[8-9]</sup>。

$$X_t = a + bt \quad (14)$$

式中:  $X_t$  为在  $t$  时间内某一元素浓度含量;  $a$  为元素

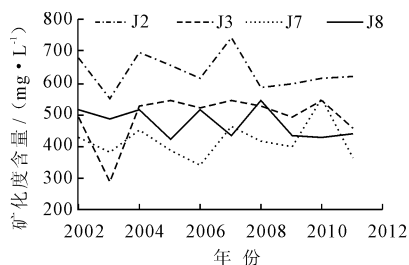


图2 地下水矿化度变化趋势

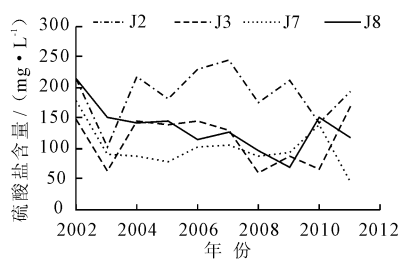


图3 地下水硫酸盐变化趋势



图4 地下水氟化物变化趋势

起始浓度;  $b$  为浓度变化趋势系数。

趋势变化分析选取 J2、J3、J7、J8 等4眼监测井数据进行分析, 总硬度计算结果见图1。

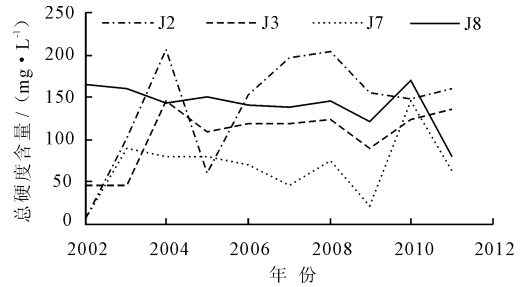


图1 地下水总硬度变化趋势

从趋势变化图可以得出, J7 监测井增长趋势缓慢, 2012年的含量比2002年增长了3.35倍, 10年来虽有所增长, 但还处于I类较好水质。J2、J3监测井增长幅度大, 2012年含量比2002年分别增长了11.6倍和6.76倍, 从单因子评价来看虽然还处于I类水质, 但是已经处于I类水质上限的边缘, 如再升高将达到II类水质。J8监测井呈下降趋势, 由于最后一次取样可能存在失误, 使最后一次的结果偏低, 导致曲线呈下降趋势。

矿化度计算结果见图2。

从趋势变化图可以得出, J2、J7、J8四口监测井的矿化度变化幅度均不大, J2变化幅度稳定在600~700 mg/L之间, J7变化幅度稳定在400~500 mg/L, J8变化幅度稳定在500 mg/L左右, 均还介于I类及II类水质之间。J3监测井矿化度有明显的升高, 上升幅度大, 对比2012年和2002年, 2012年增加了7.9倍, 水质级别已经从I类恶化到II类。硫酸盐计算结果见图3。

从变化趋势图可以得出, J2、J3硫酸盐含量趋势变化不明显, J2的增长速率为0.2765, 基本保持稳定, J3在100~150 mg/L之间浮动, 2012年硫酸盐含量相比2002年减小了1.979倍。J7、J8硫酸盐含量呈微弱下降趋势, 2012年比2002年分别下降4.7613倍和8.4768倍。氟化物计算结果见图4。

从变化趋势图可以得出,J2变化不明显,基本保持不变,稳定在0.8~1.0mg/L之间,但是已经处于Ⅰ类水质的边缘,加剧恶化将达到Ⅱ类水质。J8氟化物含量有明显的上升趋势,增长速率为0.029,已从最初的Ⅰ类水质恶化到Ⅱ类水质,水质恶化严重,还有继续恶化的趋势。

将数据用季节性 Kendall 检验法进行计算,选取 $\alpha = 0.10$ , $Z_{1-\alpha/2} = 1.645$ ,按照 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 来判断测井的污染指标变化趋势,计算结果见表7。

表7 Kendall 检验趋势分析 Z 值

测井编号	总硬度	矿化度	硫酸盐	氟化物
J2	0.179	0	0	0
J3	0.179	0	0	0.209
J7	0	-0.179	0	0
J8	-0.078	-0.078	-0.078	0.234

计算结果表明,J2、J3、J7、J8四口监测井的4种主要污染物均没有特别显著变化的趋势。

#### 4.2 地下水水质变化成因分析

(1)有多种因素可导致地下水环境变化,除自然因素下的物理作用外,地下水的补给来源也是影响水环境变化的一种主要因素。结合本研究区水文地质条件,水质变化的原因主要有:①由于当地水文地质条件影响,导致地下水中各物质含量初始值较高,导致水质较差,②因为水源地位于沙漠地区,地下水补给量少,地下水的超采导致地下水位下降。

(2)研究区位于沙漠腹地,属于典型的大陆性干旱气候,蒸发强烈,排泄方式以人工开采为主,大量的开采地下水,引起了地下水环境的改变,从而引起阳离子交替的吸附、碳酸溶滤作用的发生,导致难溶盐向水中转移,从而导致地下水总硬度升高。与此同时混层开采、超采地下水,导致地下水咸水层被穿透,咸水流入到井水中,再加上深层地下水交替循环强烈,综合造成总硬度与矿化度的上升。

(3)在沙漠干旱地区,由于温差大,有利于氟的溶解,强烈的蒸发及氧化还原反应,导致盐类含量的增高,再加上矿化度与氟的高度相关性,随着矿化度的升高,继而综合影响了氟含量的升高。

## 5 结 语

从水质评价结果来看,该研究区水质情况较好,绝大部分处于三类水质以上,属于较好水质,满足基

本的使用要求,但个别监测井水质极差,用水可能需要做适当处理。从10年水质变化趋势来看,研究区水质变化不大,没有明显的水质恶化情况发生。从本区来看,由于超采地下水,导致地下水系统被破坏,地下水原有的环境被改变,从而影响了该区地下水质的变化,总硬度、矿化度和氟化物浓度的变化趋势说明了水质往变差的方向发展。该研究区地处沙漠干旱地区,水资源匮乏,地下水是重要的水源,研究地下水水质变化情况,有利于人们认识沙漠地区地下水水质变化规律,对保护沙漠干旱区地下水资源有一定的意义。地下水是该区生产的唯一水源,只有靠开采地下水来满足生产需求,分析地下水质的变化对该水源地生产用水提供参考。该区属于地下水径流末端,地下水系统更新速度缓慢,过度开采地下水导致地下水环境的变化,影响当地生态环境的变化。

总的来说,在沙漠地区由于条件的限制,还存在着采样困难、长观资料的缺失、技术方法单一等问题。由于当地地下水属古地下水,不同时期的水文地球化学作用各不相同,还需运用同位素的方法进一步研究,进行古气候信息分析。

#### 参考文献:

- [1] 厉艳君,杨木壮.地下水水质评价方法综述[J].地下水,2007,29(5):19-24.
- [2] 王毅萍,周金龙,郭晓静.模糊综合评价法在新疆焉耆县浅层地下水水质评价中的应用[J].新疆农业大学学报,2010,33(2):167-171.
- [3] 沃飞,陈效民,吴华山,等.灰色聚类法对太湖地区农村地下水水质的评价[J].安全与环境学报,2006,6(4):38-41.
- [4] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [5] 邱林,唐红强,陈海涛,等.集对分析法在地下水水质评价中的应用[J].节水灌溉,2007(1):13-15.
- [6] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3):257-262.
- [7] 彭文启,张祥伟,等.现代水环境质量评价理论与方法[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [8] 逢勇,李学灵.珠江三角洲河网入伶仃洋污染物通量计算研究[J].水利学报,2001,32(9):40-44.
- [9] 尹华,刘文,吴延东,等.长春市浅层地下水水质现状评价及变化趋势分析[J].东北师大学报(自然科学版),2009,41(2):171-176.