

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.04.015

# 松嫩平原地下水氮污染空间变异性及健康风险评价

卞建民, 张真真, 韩宇

(吉林大学 a. 环境与资源学院; b. 地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021)

**摘要:**为探明松嫩平原地下水污染现状及氮污染影响,利用地统计学软件分析了“三氮”(硝态氮、亚硝态氮和铵态氮)含量的特征,采用 ArcGIS 绘制了地下水硝态氮的变异函数图和空间分布图,并应用健康风险评价模型进行了氮污染对人体的潜在健康风险评价。上述研究表明,该区地下水污染物以“三氮”最为突出,其中硝态氮污染最重,变异系数为 1.686,属于强变异,含量分布与二阶球状模型拟合最好,块金值和基底效应分别为 2.423 和 0.575,其含量的空间异质性是结构性因素及随机性因素共同造成的,随机性因素稍强;硝态氮污染高风险区占总面积的 88.78%,主要分布在东中部高平原区,这一区域大部分为 III 类水,对人体健康存在较高的风险,应引起关注。

**关键词:**地下水;硝态氮;空间变异;健康风险评价

中图分类号:Q689;S129

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)04-0104-08

## Spatial variability and health risk assessment of nitrogen pollution in groundwater in Songnen Plain

BIAN Jianmin, ZHANG Zhenzhen, HAN Yu

(a. College of Environment and Resources; b. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, P.R. China)

**Abstract:** In order to present the pollution distribution and influence of nitrogen in groundwater in Songnen Plain, characteristics of nitrate-nitrogen, nitrite-nitrogen, and ammonium-nitrogen are analyzed by statistics software. Semivariograms graph and spatial distribution maps of groundwater nitrate-nitrogen are described by ArcGIS. Then the risk of groundwater nitrate-nitrogen to human health is evaluated by the model of water environmental health risk assessment. The results show that the nitrate-nitrogen is the most serious pollution in groundwater and has a strong spatial variability (variation coefficient of it is 1.686). The groundwater nitrate-nitrogen fits the second spherical model well and the nugget is 2.423, the substrate effect is 0.575, which implies that nitrate-nitrogen concentration distribution is controlled by structural factors and random factors and the later has a stronger effect. The high risk of nitrate-nitrogen pollution mainly distributes in east and central high plain, which accounts for 88.78% of the total area. It should be paid more attention because the water in this region are mostly third class of water quality and has high risk to human health.

**Key words:** groundwater; nitrate-nitrogen; spatial variability; health risk assessment

收稿日期:2015-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41072255);东北地方病严重区地下水砷、氟及矿化度赋存及分布规律研究(1212010634701)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(41072255) and Occurrence and Distributive Regularity of As, F and Salinity of Groundwater in Northeast Endemic Area(1212010634701).

作者简介:卞建民(1968-),女,吉林大学教授、博导,博士,研究方向为水资源评价及水环境与水生态效应,(E-mail)bianjianmin@126.com。

地下水作为人类宝贵的淡水资源,在居民生活、工业以及农牧业供水等领域中占有重要地位,地下水安全问题直接影响居民的身体健康和生活质量。近年来,大规模的农业生产、工业含氮废水和城镇生活污水的大量排放,使地下水中因氮元素含量超标而受到污染<sup>[1]</sup>。地下水“三氮”(硝态氮、亚硝态氮和铵态氮)污染已成为国内外学者普遍关注的热点问题<sup>[2-3]</sup>,至20世纪80年代以来,国外学者就对地下水氮污染进行了大量的水质调查与检测方面的研究,为解决氮污染问题提供了可行方案<sup>[4-5]</sup>。中国对地下水“三氮”污染的研究起步较晚,近几年,国内逐步开展了地统计方法在地下水氮污染方面的应用探索<sup>[6-8]</sup>。然而,多数研究主要集中在对地下水“三氮”污染特征及污染来源方面<sup>[10-12]</sup>,而系统的分析其空间变异性和对人体健康构成的潜在风险的研究较少<sup>[13-14]</sup>。

松嫩平原是中国重要的商品粮基地,位于东北平原腹地,属于半干旱半湿润的大陆性季风气候,研究区水资源总量为 $132.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地下水开采资源量为 $79.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占水资源总量的59.53%<sup>[15]</sup>,地下水水资源是区域重要水源。近年来,受自然条件、地质环境及人类活动的影响,区域地下水受到了一定程度的污染,尤其是由于工农业发展引起的地下水中氮含量超标问题十分严重,对饮用水人群的健康存在极大的潜在风险。为此,笔者以松嫩平原地下水为研究对象,在利用半变异函数方法系统的分析地下水硝态氮的空间变异性的基础上,对地下水水质存在的潜在健康风险进行评价,为进行地下水氮污染控制与治理,促进区域可持续发展提供重要理论依据。

## 1 研究区概况

松嫩平原是东北三大平原(松嫩平原、辽河平原、三江平原)之一,行政区跨黑龙江、吉林两省和内蒙古自治区东部,地理坐标为 $N44^{\circ}38'57''-49^{\circ}16'14''$ , $E122^{\circ}59'05''-128^{\circ}14'12''$ 。该区西、北、东三面分别为大、小兴安岭、张广才岭、丘陵山地所环绕,南部以嫩江、松花江及拉林河为界。松嫩平原是由第三系始新统-渐新统依安组、中新统大安组、上新统泰康组和下更新统承压水在内的多层叠置结构的大型蓄水盆地,根据区域地貌分布特征可分为东部高原、中部低平原、西部大兴安岭山前倾斜平原及河谷平原4个水文地质分区(图1),东部高原和西侧的大兴安岭山前倾斜平原,既是山区基岩裂隙水的排泄区,又是中部承压水盆地的主要补给区<sup>[16]</sup>。

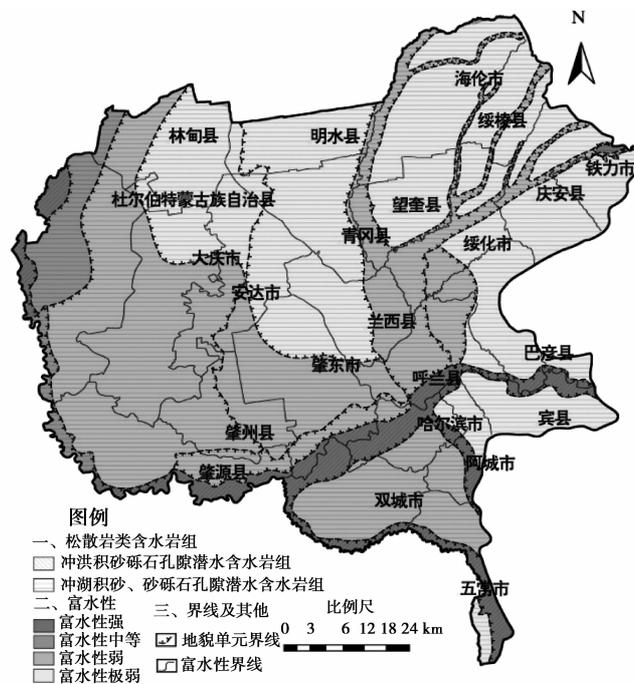


图1 研究区水文地质图

Fig.1 Hydrogeological division of study area

研究区农业发展迅速,耕地面积逐年增加,化肥、农药施用量增大,城镇密集,人口集中,生活污水排放量

较大,工业发展增加了含氮废水的排放量,同时,受区域水文地质条件的影响,地下水本身的自净能力有很大差异,地下水中“三氮”含量的空间分布有很大不同,对人体健康存在潜在风险,因此,在分析其空间变异特征的基础上进行健康风险评价是十分必要的。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

根据研究区水文地质状况,依托东北地区地方病严重区地下水砷、氟及矿化度赋存及分布规律研究项目,分别在松嫩平原进行了野外调查和样品采集,水样采用瞬时采样法。并搜集了近年来区域相关的地下水动态监测和污染调查等多方面资料<sup>[14-16]</sup>。地下水测试项目包括  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  的质量浓度,分别采用紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法和比色法进行测试,其检出限分别为 0.01, 0.01 和 0.002 mg/L<sup>[17]</sup>。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 半方差函数及理论模型

半方差函数也称为半变异函数,是表示区域化变量空间相关性的重要函数,能够用来研究属性空间分布的随机性与结构性,定量化描述其空间异质性<sup>[18-19]</sup>。半方差函数的表达式如下,

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; $h$ 为步长或位差,即样本间隔距离; $N(h)$ 为步长为 $h$ 的样品对数; $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i + h)$ 为区域化变量在空间位置 $x$ 、 $x_i$ 处的观测值。

$\gamma(h)$ 是 $h$ 的滞后单增函数,其变化可用半变异曲线表示,主要有4个参数:块金值、变程、基台值、偏基台值,理论半变异函数模型主要有球状模型、指数模型、高斯模型和幂函数模型,根据各个参数及残差、决定系数和块金值选择模型进行拟合,通过交叉验证修正模型参数。

块金值表示随机变量,由测量误差和空间变异任意一方或两者共同作用,半变异函数值不为0,块金值存在,偏基台值为结构方差,反映非随机因素引起的变量的空间自相关性,基底效应表示样本间的变异特征,当基底效应小于25%时,表明空间变异性较强,该值越小,表示受结构性因素影响越大;介于25%~75%之间时,空间相关性中等,表示受随机性因素与结构性因素的影响;大于75%时,空间变异性较弱,该值越大,表示受随机性因素影响越大。结构性因素是指水文地质条件,主要包括包气带岩性、包气带厚度、降雨入渗系数和水位埋深等因素,随机性因素是指人类活动,主要包括化肥、农药施用和地下水开采等因素。

#### 2.2.2 健康风险评价模型

地下水氮污染健康风险评价采用美国环保局(US Environmental Protection Agency)提供的健康风险评价模型和评价标准,评价模式包括危害识别、剂量-效应分析、暴露评价及风险表征等四个部分,评价过程根据EPA综合风险信息识别目标污染物的危害<sup>[20]</sup>。硝态氮及铵态氮属于非致癌物,其评价模型采用非致癌风险评价模型,表达式如式(2)~(4)所示。

$$\text{THI} = \sum_{i=1}^n \text{HI}_i, \quad (2)$$

$$\text{HI} = \frac{E}{\text{RfD}}, \quad (3)$$

$$E = \frac{C \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}}, \quad (4)$$

式中:THI为总非致癌风险指数; $n$ 为引起非致癌效应慢性毒害的目标物质的总数;HI为风险指数;RfD为地下水中目标物质的参考剂量,(mg/L·d); $E$ 为暴露剂量; $C$ 为目标物质的质量浓度,mg/L;IR为每日饮水量,一般取值为2L/d;EF为暴露频率,通常取值为365 d/a;ED为饮水持续时间,表示人体终生摄入致癌物的年数;BW为人体平均体重,一般取值70 kg;AT暴露发生的平均时间,d,致癌效应为70 a×365 d/a,非致癌效应为30 a×365 d/a。

根据美国EPA推荐的风险评价标准,总致癌风险评价标准为1,当THI大于1时,表明人体所承受的非致癌风险度较大,对人体健康造成一定威胁;当THI小于1时,承受风险较小,在可接受范围内,不会对人体健康造成威胁<sup>[21]</sup>。

### 3 结果讨论

#### 3.1 地下水“三氮”污染状况

利用 SPSS 软件对研究区地下水“三氮”含量进行描述性统计分析,分析结果如表 1 所示。

表 1 地下水“三氮”含量统计分析结果

检测项目	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
最大值/(mg·L <sup>-1</sup> )	937.82	1.924	6.22
最小值/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.05	0.002	未检出
平均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	95.52	0.079	0.50
检出率/%	56.05	2.564	30.30
超标率/%	82.78	20.439	33.69
标准差	161.08	0.229	0.92
变异系数	1.69	2.882	1.73

由表 1 可以看出,地下水中硝态氮含量的检出率高达 56.05%,而铵态氮和亚硝态氮含量检出率较低,分别为 30.30%、2.56%;硝态氮含量超标率最高,为 82.78%,而铵态氮和亚硝态氮超标率仅为 33.69%、20.44%;硝态氮、铵态氮、亚硝态氮的变异系数分别为 1.69、1.73 和 2.88,表明“三氮”含量的空间变异性较大,空间分布有较大差异。由上述分析知,研究区地下水硝态氮污染最为严重,且具有较强的空间变异性,因此,仅对硝态氮引起的地下水污染进行研究。

#### 3.2 硝态氮含量的空间变异结构分析

利用 ArcGIS 地统计模块直方图检验出地下水中硝态氮含量分布符合对数变换的正态分布,进一步进行趋势性分析和结构性分析。

##### 3.2.1 趋势效应分析

利用地统计分析中的趋势分析模块分析硝态氮含量趋势变化,得到的趋势性效应图如图 2 所示。

由图 2 可知,左后投影线和右后投影线的变化趋势表明,硝态氮含量在空间分布呈由西向东增加、由北向南逐渐减小的趋势。根据趋势类型,利用 Arcinfo 地统计分析模块的克里金插值法选择 0 阶、1 阶和 2 阶趋势效应参数,计算比较插值误差,选择最优模型。选择标准为:标准平均值(mean standardized)最接近于 0;均方根预测误差(root-mean-square)最小;平均标准误差(average standardized error)最接近于均方根预测误差;标准均方根预测误差(root-mean-square standardized)最接近于 1。各趋势参数的选取及误差计算结果见表 2。

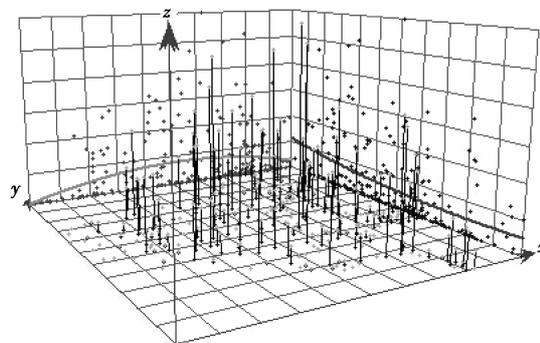


图 2 硝态氮含量趋势分析图

Fig.2 Trend analysis of nitrate-nitrogen concentration

表 2 模型参数及插值误差统计表

Table 2 The statistics of model parameters and interpolation error

趋势类型	模型类型	预测误差				
		ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
零阶	高斯	1.707	157.854	0.011	1.003	157.687
	球状	1.412	158.040	0.009	1.008	156.987
	指数	-2.172	169.527	-0.007	1.120	150.304

续表

趋势类型	模型类型	预测误差				
		ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
一阶	高斯	-1.875	166.509	-0.006	1.124	148.089
	球状	-1.605	167.482	-0.003	1.153	148.124
	指数	-1.343	166.064	-0.005	1.103	149.300
二阶	高斯	-2.516	168.473	-0.008	1.104	150.885
	球状	-0.431	160.649	-0.001	1.049	152.773
	指数	-1.791	165.481	-0.007	1.082	151.727

根据最优模型参数的选择标准,对比分析插值模型的计算误差发现,地下水硝态氮含量空间分布与二阶球状模型拟合最好,因此,选取二阶球状模型进行参数修正。

3.2.2 半变异函数分析

根据插值误差统计结果,对拟合的半方差函数进行模型参数修正,建立最优函数模型,各修正后的参数见表 3,拟合的最优半方差函数模型见图 3。

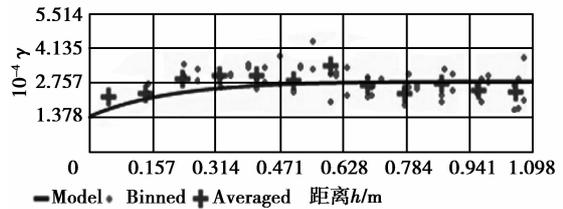


图 3 最优半方差函数模型

Fig.3 The optimal semi-variance function model

表 3 最优半方差函数模型及其参数

Table 3 The optimal semi-variance function model and parameters

趋势类型	模型类型	变程		各向异性比	方位角	块金值	偏基台值	基底效应
		长半轴	短半轴					
零阶	指数	1.098	0.366	2.998	75.059	2.423	1.793	0.575

由表 3 可知,硝态氮的块金值为 2.423,表明地下水硝态氮含量存在空间变异性;偏基台值为 1.793,表明硝态氮空间自相关部分是由非随机性因素引起的;基底效应为 0.575,表明硝态氮分布具有中等空间变异性,该变异性是由区域水文地质条件和人类活动共同作用造成的,且人类活动的影响较强烈。由图 3 可以直观的看出,实测的变异函数离散值与理论变异函数曲线拟合较好,大部分离散点均能落在函数曲线两侧及附近,该变异函数球状模型较好的对变量的变化特征进行了模拟,其参数能够反映出变量的空间变化特征。

3.2.3 硝态氮空间分布特征

由以上地统计分析半变异函数分析结果可知,二阶球状模型能够较好的模拟地下水硝态氮含量空间分布特征。根据模型校正后的参数,利用克里格插值法对研究区地下水硝态氮含量进行最优无偏插值,得到硝态氮含量的空间分布图,如图 4 所示。

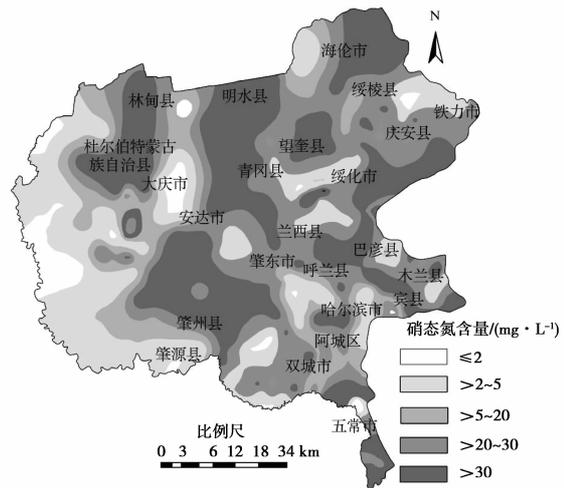


图 4 硝态氮空间分布图

Fig.4 Zoning map of nitrate-nitrogen in groundwater

参考地下水环境质量标准<sup>[22]</sup>,当地下水硝态氮含量大于 20 mg/L 时,地下水类型为水质较差的 IV、V 类水,反之,为水质较好的 I、II、III 类水。由上图可以看出,研究区地下水硝态氮污染十分严重,且呈面状污

染,污染面积较大,尤其是 V 类水的分布区域最广。水质较差的区域约占研究区总面积的 62%,集中分布在东中部高平原地区,包括明水县、望奎县、肇州县、海伦市、巴彦县等地;受相对污染较轻的地区约占总面积的 38%,主要分布在西部冲洪积平原区,包括大庆市、肇源县、安达市等地,在其他地区只有零星分布。

地下水硝态氮污染的空间变异性表明,硝态氮污染的驱动因子主要为自然因素和人类活动,人类活动影响较强烈,是硝态氮污染变化的直接影响因素。

氮素所处的周围环境决定着地下水中氮的迁移能力、迁移途径及富集程度。在 IV、V 类水分布区,该区为粮食主产区,农作物种植范围大,总施肥量较大,地下水埋藏较浅,施入农田的化肥氮极易被降水或灌水淋溶到地下水中,引起地下水的硝态氮含量升高。此外,区域包气带岩性为砂岩、砂砾石岩,分选性好,对污染物的吸附与降解能力弱;包气带厚度较小,缩短了污染物进入含水层的时间,降低了包气带对污染物的自净能力,增大了地下水的污染风险;区域降雨入渗系数达 0.3~0.7,透水性强,极易使降雨和灌溉水携带污染物进入地下水中,因此,该区地下水污染严重。

在 I~III 类水分布的西部地区,耕地少,农田种植范围较小,化肥农药使用少,同时,区域水力坡度大,包气带厚度大,氮污染物经过包气带过滤作用不易进入地下水,地下水自净能力强,水质较好。

### 3.3 地下水硝态氮污染的健康风险评价

针对研究区地下水受硝态氮污染严重、污染范围广的特点,为研究硝态氮污染对人体健康产生的危害风险,对其进行健康风险评价。

由美国 EPA 提供的健康风险评价属性数据可知,硝态氮的参考计量为  $1.6 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})^{[23]}$ ,利用非致癌物健康风险评价模型(式(2)~(4))计算出硝态氮的风险指数范围为 0.001~39.075,共有 121 个采样点超标,超标率高达 44.485%,表明地下水硝态氮污染对人体健康构成较大威胁。由地下水硝态氮质量分级值和式(2)~(4)计算出相应的地下水非致癌慢性毒害指数见表 4。

表 4 地下水硝态氮质量浓度限值与毒害指数

Table 4 Quality classification and toxic index of nitrate-nitrogen in groundwater

质量浓度分级值	I	II	III	IV	V
含量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\leq 2$	$\leq 5$	$\leq 20$	$\leq 30$	$> 30$
毒害指数	$< 0.151$	$0.151 \sim < 0.400$	$0.400 \sim < 1.572$	$1.572 \sim < 2.389$	$\geq 2.389$

由上表可知,地下水类型为 I 类和 II 类水时,慢性毒害风险指数小于 0.400,在可接受范围内;地下水类型为 IV 类和 V 类水时,慢性毒害指数大于 1,属于不可接受范围;地下水类型 III 类水时,其慢性毒害指数为  $0.400 \sim < 1.572$ ,表明部分 III 类水会对人体健康产生影响,在不可接受范围内。根据硝态氮的慢性毒害指数将研究区分为高风险区和低风险区,利用 ArcGIS 绘制地下水硝态氮健康风险评价图,见图 5。

由图 5 可知,研究区地下水硝态氮污染对人体健康的高风险区面积较大,分布范围广泛,占总面积的 88.78%左右,高风险区主要分布在东部高平原区和中部低平原区,该区属于农业活动强烈的灌区和人口居住密集、工业相对发达的城镇区,包括海伦市、明水县、安达市、肇州县等地,该区同时也是松嫩平原主要的供水水源地,应该引起相关部门的注意。低风险区分布范围较小,占总面积的 11.22%左右,主要分布在西部冲洪积平原区,其他地区还有零星分布。

对比硝态氮含量分布范围及健康风险区可知,高风险区涵盖了 IV 类、V 类及部分 III 类水分布区,其余部分为低风险区,表明在地下水环境质量标准中能够饮用的部分 III 类水对人体健康存在风险。因此,有必

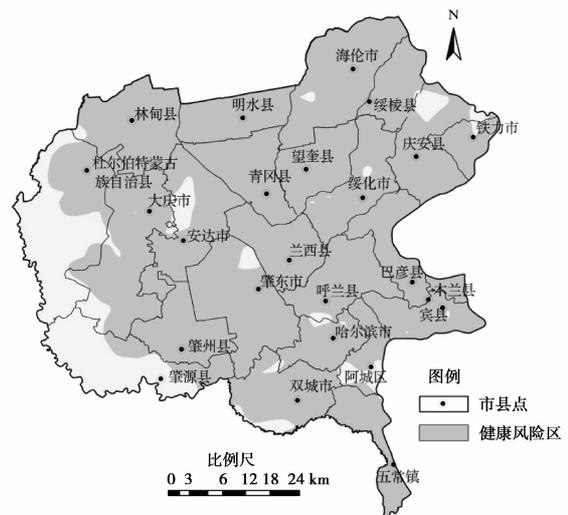


图 5 硝态氮健康风险评价图

Fig.5 Health risk evaluation of nitrate-nitrogen in groundwater

要针对区域地下水污染现状,结合区域水文地质背景条件,开展基于健康风险的地下水水质安全管理工作,避免或减小地下水氮污染对居民健康的影响。

## 4 结 论

利用半变异函数理论分析松嫩平原地下水硝态氮的空间变异特征,对硝态氮污染进行健康风险评价,得到的主要结论如下。

1) 松嫩平原地下水中“三氮”含量的描述性统计结果表明,硝态氮含量平均值为 95.52 mg/L,超标率高达 82.78%,污染最为严重。其变异系数为 1.69,具有较强的空间变异性,含量分布与二阶球状模型拟合最好。

2) 硝态氮块金值为 2.423,偏基台值为 1.793,基底效应为 0.575,位于 25%~75%之间,表明松嫩平原地下水硝态氮含量的空间异质性是结构性因素及随机性因素共同作用下造成的,即受水文地质条件和人类活动的共同影响,人类活动作用较强烈。

3) 硝态氮污染严重的区域主要分布在东中部高平原地区,主要是由强烈的农业活动和较弱的地下水自净能力是导致的;污染较轻的地区主要分布在西部山前倾斜平原。

4) 硝态氮污染高风险区分布广泛,占总面积的 88.78%,包括海伦市、明水县、安达市、肇州县等地,同时也是 III 类水分布区,研究区部分 III 类水对人体健康存在高风险,该区作为松嫩平原主要供水水源地应引起管理部门的重视。

### 参考文献:

- [1] 叶为民,金麒麟,黄雨,等. 地下水污染试验研究进展[J]. 水利学报,2005,36(2):251-255.  
YE Weimin, JIN Qi, HUANG Yu, et al. Review on advance in experimental study of pollution dispersion in groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 251-255. (in Chinese)
- [2] Nestler A, Berglund M, Accoe F, et al. Isotopes for improved management of nitrate pollution in aqueous resources: review of surface water field studies [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2011, 18(4): 519-533.
- [3] 许可. 地下水中三氮污染物研究综述与展望[J]. 工程勘察, 2012(8): 32-35.  
XU Ke. Progress on three forms of nitrogen contaminant transport and transform in groundwater[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(8): 32-35. (in Chinese)
- [4] Grizzetti B, Pretato U, Lassaletta L, et al. The contribution of food waste to global and European nitrogen pollution[J]. Environment Science and Policy, 2013, 33: 186-195.
- [5] Hou X Y, Ying L L, Chang Y Y, et al. Modeling of non-point source nitrogen pollution from 1979 to 2008 in Jiaodong Peninsula, China[J]. Hydrological Process, 2014, 28: 3264-3275.
- [6] 顾颖,孙东宝,王庆锁,等. 巢湖流域地下水硝态氮的分布及其影响因素研究[J]. 中国农业科技导报,2011,13(1):68-74.  
GU Ying, SUN Dongbao, WANG Qingsuo, et al. Studies on groundwater nitrate nitrogen distribution and its affection factors in Chao Lake Watershed[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(1): 68-74. (in Chinese)
- [7] 孙世卫,雷玉平,郑力,等. 河北省中南部农区地下水硝态氮含量特征分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2007, 27(2):31-36.  
SUN Shiwei, LEI Yuping, ZHENG Li, et al. Spacital variation of natrate contents of groundwater in middle-south agricultural area of Hebei Province[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2007, 27(2): 31-36. (in Chinese)
- [8] 伍坤宇,王鹏,沈立成,等. 金佛山地区地下水硝态氮污染时空变异性研究[J]. 环境科学,2011,32(11):3247-3255.  
WU Kunyu, WANG Peng, SHEN Licheng, et al. Spatial and temporal variability of nitrate contaminant in groundwater in Jinfo Mt. Area, Chongqing, China[J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3247-3255. (in Chinese)
- [9] 李小牛,周长松,周孝德,等. 污灌区浅层地下水污染风险评估研究[J]. 水利学报,2014,45(3):326-334.  
LI Xiaoni, ZHOU Changsong, ZHOU Xiaode, et al. Study on risk assessment of groundwater pollution in sewage irrigation area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 326-334. (in Chinese)
- [10] 刘英华,张世熔,张素兰,等. 成都平原地下水硝态氮含量空间变异研究[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(1):114-118.  
LIU Yinghua, ZHANG Shirong, ZHANG Sulan, et al. Spatial variation of nitrate content in groundwater in Chengdu Plain[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(1): 114-118. (in Chinese)

- [11] 王庆锁,孙东宝,郝卫平,等.密云水库流域地下水硝态氮的分布及其影响因素[J].土壤学报,2011,48(1):141-149.  
WANG Qingsuo, SUN Dongbao, HAO Weiping, et al. Nitrate concentration distribution in groundwater of the Miyun Reservoir Watershed[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 141-149. (in Chinese)
- [12] 陆红娜,唐泽军,冯绍元,等.北京市顺义区浅层土壤硝态氮的空间变异特征分析[J].环境科学学报,2010,30(12):2563-2570.  
LU Hongna, TANG Zejun, FENG Shaoyuan, et al. Spatial variability of nitrate content in different soil layers in the Shunyi District of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(12): 2563-2570. (in Chinese)
- [13] 孟晓路,梁秀娟,盛洪勋,等.吉林市城区地下水中总氮的分布规律及迁移影响因素分析[J].水土保持研究,2007,14(6):85-87,141.  
MENG Xiaolu, LIANG Xiujuan, SHENG Hongxun, et al. Analysis of distribution law and influence factors of transportation of total nitrogen in groundwater in Jilin City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6):85-87,141. (in Chinese)
- [14] 邢志武.松嫩平原地下水氟、砷富集规律及影响因素研究[D].长春:吉林大学,2009.  
BING Zhiwu. Study on the enrichment laws and influencing factors of arsenic and fluoride in groundwater in the SongNen Plain[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [15] 章光新,邓伟,何岩,等.中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J].水科学进展,2006,17(1):20-28.  
ZHANG Guangxin, DENG Wei, HE Yan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, northeast China[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):20-28. (in Chinese)
- [16] 朱巍.松嫩平原浅层地下水水质状况发展趋势研究[D].长春:吉林大学,2011.  
ZHU Wei. Songnen plain development trend of water quality groundwater[D]. Changchun, Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [17] 环境保护部. HJ/T 535-2009 中华人民共和国国家环境保护行业标准:水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法[S].北京:中国环境科学出版社,2009.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ/T 535-2009 Environmental protection standard of the People's Republic of China: water quality — determination of ammonia nitrogen — Nessler's reagent spectrophotometry[S]. Beijing: China Environmental Publishing, 2009. (in Chinese)
- [18] 尹世洋,吴文勇,刘洪禄,等.再生水灌区地下水硝态氮空间变异性及污染成因分析[J].农业工程学报,2012,28(18):200-207.  
YIN Shiyang, WU Wenyong, LIU Honglu, et al. Spatial variability of groundwater nitrate-nitrogen and cause analysis of its pollution for irrigation area with reclaimed water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 200-207. (in Chinese)
- [19] 许义和,魏晓妹,蔡明科,等.基于地统计学的宝鸡市区地下水位空间变异特征研究[J].水土保持研究,2011,18(1):210-214.  
XU Yihe, WEI Xiaomei, CAI Mingke, et al. Geostatistics-based study of spatial variability of groundwater level in Baoji urban area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 210-214. (in Chinese)
- [20] 赵娟,李育松,卞建民,等.吉林西部地区高砷地下水砷的阈值分析及风险评估[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(1):251-258.  
ZHAO Juan, LI Yusong, BIAN Jianmin, et al. Threshold analysis and health risk assessment of arsenic in groundwater in western Jilin Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2013, 43(1): 251-258. (in Chinese)
- [21] 罗庆,孙丽娜,张耀华.细河流域地下水中持久性有机氯污染物的健康风险评估[J].水土保持研究,2011,18(6):119-124.  
LUO Qing, SUN Lina, ZHANG Yaohua. Health risk assessment of persistent organochlorine pollutants in groundwater from Xihe river area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 119-124. (in Chinese)
- [22] 国家技术监督局. GB/T 14848-93 地下水环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,1993.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 14848-93 Environmental and quality standard of underground water[S]. Beijing: China Standards Press, 1993. (in Chinese)
- [23] 张光贵.岳阳市地下水污染健康风险评估[J].水资源与水工程学报,2013,24(6):206-210.  
ZHANG Guanggui. Health risk assessment of groundwater pollution in Yueyang[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(6): 206-210. (in Chinese)