

东北海伦地区农村地下饮用水硝态氮污染特征及其影响因素分析

赵新峰^{1, 2}, 杨丽蓉^{1, 2}, 施茜¹, 马岩^{1, 2}, 张燕燕^{1, 2}, 陈利顶^{1*}, 郑海峰^{1, 2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 地下水硝态氮污染已成为一个全球性的问题, 直接影响到人们的生活用水和身体健康. 通过对海伦地区 157 口农村饮用水井取样分析, 探讨了该地区地下水硝态氮污染的时空特征及其影响因素. 结果表明, 地下水中硝态氮平均含量 $14.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超标率 ($\geq 10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 达到 26.11%. 地下饮用水硝态氮的污染表现出明显的空间分异特征, 在空间上地下水硝态氮污染程度从高到低依次为中部漫川漫岗农业区、东北丘陵漫岗农业区、西南平川漫岗农业区. 在此基础上, 从水井本身性质和污染物来源两方面分析了地下水硝态氮污染影响因素. 在水井本身性质方面, 水井管道材料不同导致地下水硝态氮受污染程度不同, 其中单节管道水井的污染程度显著低于多节管道, 平均浓度分别为 5.08 、 $32.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超标率分布为 12.26%、82.35%; 整个地区水井硝态氮污染程度与水井绝对深度无显著关系, 但在 28 个同一取样单元, 深水井污染程度显著低于浅水井, 其中单节管深井、单节管浅井、多节管深井、多节管浅井的平均浓度分别为 1.84 、 12.02 、 25.14 、 $45.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 分析污染物来源可以发现, 污染程度较高的地区多处于氮肥施用量较高、户均家禽牲畜量较多的地区, 表明地下水硝态氮污染与化肥施用量以及家禽牲畜排泄量呈一定的正相关关系.

关键词: 硝态氮; 污染; 水井管道; 水井深度; 氮肥; 家禽牲畜

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)11-2993-06

Nitrate Pollution in Groundwater for Drinking and Its Affecting Factors in Hailun, Northeast China

ZHAO Xin-feng^{1, 2}, YANG Li-rong^{1, 2}, SHI Qian¹, MA Yan^{1, 2}, ZHANG Yan-yan^{1, 2}, CHEN Li-ding¹, ZHENG Hai-feng^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Nitrate pollution in groundwater has become a worldwide problem. It may affect the water quality for daily use and thus the health of people. The temporal and spatial characteristics of nitrate pollution in the groundwater were addressed by sample analysis of the drinkable water from 157 wells in Hailun, Heilongjiang, northeastern China. It was found that the mean value of nitrate concentration in all wells was $14.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Of all the samples, the nitrate concentrations of 26.11% wells exceeded the standard of drinkable water ($10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). A significant difference was found on the spatial distribution of nitrate pollution in the study area. The pollution degree in term of nitrate pollution was in the order: the central rolling hills and flooding plain > the northeastern mountain area > the southwest rolling hills and plain. Based on the results, the factors causing the pollution we analyzed from the well properties and pollution sources. As for well properties, the type of the pipe material plays a critical role in the groundwater nitrate pollution. It was found that the wells with seamless pipe have less pollution than those with multiple-sections pipe. The concentrations of seamless pipe wells and multiple ones were respectively $5.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $32.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 12.26% and 82.35% of these two kinds wells exceeded $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the state drinking water standard. In the whole Hailun, there is no statistically relationship between nitrate-N levels of wells and the well depth. However, a statistically lower nitrate-N was observed in the deep wells than that in the shallower ones. The mean values of nitrate concentration of the seamless-pipe deep wells, seamless-pipe shallow wells, multiple-section-pipe deep wells and multiple-section-pipe shallow wells were 1.84 , 12.02 , 25.14 and $45.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Analysis of pollution source shows that the heavily polluted regions are usually associated with large use of nitrogen fertilizer and household livestock or poultry. This indicates a positive correlation between the nitrate-N pollution of groundwater and the nitrogen fertilizer, household livestock, poultry.

Key words: nitrate-N; pollution; well pipes; well depth; nitrogen fertilizer; poultry and livestock

在以地下水为主要饮用水源的农业地区, 由于农业活动频繁, 化肥施用量不断增加, 地下水硝态氮污染存在潜在危险. 近些年来, 国内外研究发现许多地区地下水中存在着硝态氮污染问题^[1~4]. Muller 等^[5]通过研究指出, 硝态氮在地下水中的地球化学

收稿日期: 2008-02-03; 修订日期: 2008-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB211107); 国家自然科学基金项目(40621061)

作者简介: 赵新峰(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农业非点源污染, E-mail: xzfzhao1982@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: liding@rcees.ac.cn

背景值一般 $< 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超出 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 就表明该处地下水受到了人类活动的影响. 而世界卫生组织对可供人类饮用的地下水中硝态氮含量, 规定为最高标准 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 美国环保局报告也认为可以将硝态氮浓度作为地下水水质众多指标的指示物^[6]. 针对地下水中硝态氮污染严重与超标情况, 发达国家在大量污染现状研究的基础上, 开展了许多关于硝态氮污染影响因子及其防治对策和区域模拟方面的研究^[1, 7, 8]. 国内也开展了大量的相关研究^[9~14], 但主要还集中在污染状况调查方面, 对区域模拟和修复技术的报道还不多.

黑龙江省海伦市属于典型的农业地区, 地下水是农村饮用水的最主要来源, 地下水中的硝态氮污染将会直接危害到该区人民的身体健康^[15, 16]. 本研究通过调查、取样, 分析了该区地下水硝态氮的空间分布特征, 并从污染途径与污染源两方面探讨了地下水硝态氮污染的影响因子. 在此基础上, 针对现有污染状况与影响因子提出了解决现有问题的一些建议. 研究结果对于指导该区农田生态系统管理和降低农村饮用水污染风险具有重要意义.

1 研究区域与方法

1.1 研究地区

海伦市位于黑龙江省中部, 地处北纬 $46^{\circ}58' \sim 47^{\circ}52'$, 东经 $126^{\circ}14' \sim 127^{\circ}45'$ 之间, 海拔最高 471 m , 最低 147 m , 一般在 200 m 左右. 该区属大陆性季风气候, 年降水量 $500 \sim 600 \text{ mm}$, 境内有扎音河、海伦河、靛鞞沟子 3 条河流横穿东西, 东以克音河、西以通肯河为界, 水网比较发达. 海伦市位于世界上最主要的三块黑土地之一, 是重要的商品粮基地之一, 作物主要以大豆、玉米为主, 局部地区有水稻种植. 而农户家庭饮用水主要为各户单独打井取水.

1.2 地下水采样

如图 1 所示, 根据农业区划以及村庄的实际空间分布, 在各个村庄根据井深、水井管道材料, 选取有代表性的水井进行采样分析, 在海伦市 22 个乡镇共采集了 157 口水井水样. 为减轻降雨事件对水质的影响, 取样在降雨过后 7 d 开始, 并于 1 周内完成所有取样工作. 对每一个水井均采用 GPS 定位, 并记录水井的深度、管道材料、使用年限, 以及所属乡镇、村名和井所处地貌位置.

1.3 实验方法

将水样通过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 采用紫外分光光度法^[17]测定硝酸盐含量, 精度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

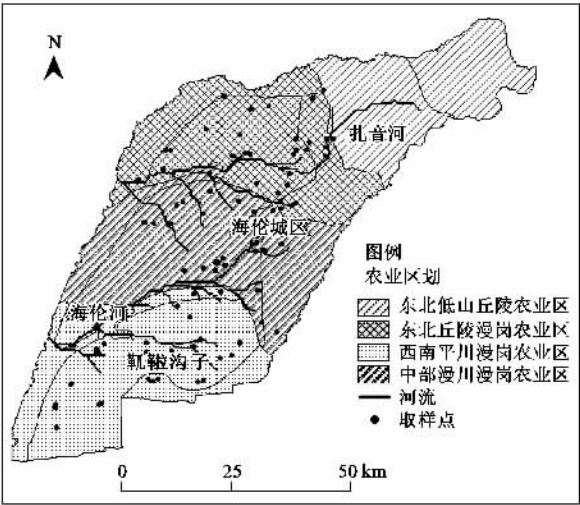


图 1 地下水井采样分布
Fig. 1 Location of sampled wells in the survey

1.4 水质标准

采用国际饮用水标准 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为限制值, 将超过标准值水样的百分比作为超标率; 以 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 值作为参考, 判断是否受到人类活动的影响, 超过 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 水样的百分比作为影响率.

2 结果与讨论

2.1 地下水硝态氮污染状况分析

2.1.1 地下水硝态氮污染状况

表 1 显示了研究地区不同用途水井中硝态氮污染状况. 从中可以看出, 灌溉水井硝态氮含量显著低于饮用水井, 这与当地不同用途水井所处地理位置以及出水量有关. 一般家庭饮用水井需水量相对较少, 考虑打井成本, 农户选择在住房附近打井, 且井较浅; 而灌溉水井一般位于地势相对低的水田附近, 由于灌溉需水量较大, 水井一般建造较深. 此外, 主要用于灌溉的水井打井年份较短, 井管材料多选择塑料管等新型材料, 管道封闭性较好. 因此灌溉水井硝态氮污染比饮用用途水井污染程度低, 这与国外部分研究结果相符^[1], 但与国内部分研究结果相反^[18].

表 1 不同用途水井硝态氮污染状况
Table 1 Nitrate contamination of wells with various functions

主要用途	样本数	平均含量 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	标准差	最大值 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	超标率 $/\%$	影响率 $/\%$
灌溉水井 ¹⁾	7	0.80	1.10	2.99	0.00	14.29
饮用水井	150	14.62	22.95	112.92	27.33	46.00
总计	157	14.01	22.61	112.92	26.11	44.59

1) 该地区部分灌溉水井主要功能为灌溉, 但同样也用于居民饮用, 因此, 在后面分析部分, 取样的灌溉水井与饮用水井统一作为饮用水进行分析

2.1.2 硝态氮污染空间分布状况

根据区域农业生产资源与自然环境特征、农业生产水平以及生产结构,将海伦市由东北向西南分为东北低山丘陵农业区、东北丘陵漫岗农业区、中部漫川漫岗农业区、西南平川漫岗农业区 4 个农业区^[19]。区域由东北向西南,年降水量、高程均呈递减趋势,蒸发量和气温则呈递增趋势。从表 2 可以看出,

东北低山丘陵农业区样本较少,仅有 4 个,这是由于东北低山丘陵农业区为农林交错带,居民点较少,家庭饮用水井也较少。其他 3 个农业区中,以中部漫川漫岗农业区地下水硝态氮污染状况最为严重,超标率高达 45.10%,其次为东北丘陵漫岗农业区,污染较严重,超标率达到了 32.61%,西南平川漫岗农业区相对来说污染最轻,但超标率也达到了 25%。

表 2 海伦市农村地下水硝态氮污染特征

Table 2 Nitrate contamination of groundwater in rural areas of Hailun

农业分区	样本数	平均值/mg·L ⁻¹	标准差	最大值/mg·L ⁻¹	超标率/%	影响率/%
东北低山丘陵	4	31.77	20.52	54.20	75.00	100.00
东北丘陵漫岗	46	12.73	20.67	74.42	32.61	41.30
中部漫川漫岗	51	16.53	24.80	112.92	45.10	56.86
西南平川漫岗	56	11.49	21.96	80.86	25.00	32.14

2.2 地下水硝态氮污染的影响因素分析

研究表明,地下水硝态氮污染程度与很多因素有关^[1, 20~24],包括井深、水井构造、地下水埋深、土壤类型、降雨、土地利用、农业活动、水文地质构造、地球化学背景等等。总体来说,污染物主要通过污染源与传输途径影响地下水硝态氮含量,在本研究中,笔者发现水井管道类型、水井深度与硝态氮污染状况具有明显的相关关系,而从污染源方面分析,农业活动和其他人类活动也在区域上与硝态氮地下水污染状况呈明显的空间相关。

2.2.1 水井管道材料对硝态氮含量影响

研究区水井管道材料主要有塑料、水泥、陶瓷、铁管等几种,其中水泥、瓷器等管道一般由许多节管道连成,而塑料管道由单节组成,铁管由于焊接也可近似为单节管道。因此,水井按管道材料不同可以分为两大类:单节管道水井和多节管道水井。

由表 3 中可以看出,多节管道水井硝态氮含量、超标率都显著高于单节管道。多节管道水井平均含量为 32.57 mg·L⁻¹,超标率达到了 82.35%,而单节

管道水井平均含量仅为 5.08 mg·L⁻¹,超标率只有 12.26%。从各个农业分区来看,单节管道硝态氮污染状况也远低于多节管道。通过对 2 种管道材料水井做独立样本的 *t* 检验,可以得到, *F* = 42.35, *p* < 0.01,说明在整个区域中,多节管道水井地下水硝态氮含量显著高于单节管道水井。由于每一节水管一般为 2 m,而多节管道水井在接口处可能存在一定缝隙,因此地表污染物以及浅层地下水更容易入渗进入水井。

从农业分区上看,中部漫川漫岗农业区硝态氮污染状况在 2 种结构水井管道类型中均表现为最严重;在西南平川漫岗农业区,单节管道水井硝态氮含量为 1.39 mg·L⁻¹,远低于其他区域,超标率也仅为 2.56%,而多节管道水井超标率高达 76.47%,比东北丘陵漫岗农业区略高;东北丘陵漫岗农业区中单节管道水井超标率与中部农业区近似,但人类活动影响显著低于中部农业区。由此可知,中部农业区地下水硝态氮污染受到人类活动影响最大,可能与该地区离城区较近,农业开发强度以及其他人类活动

表 3 不同管道材料水井硝态氮污染状况

Table 3 Nitrate contamination in the wells with different pipe material

管道类型	农业分区	样本数	平均值/mg·L ⁻¹	标准差	最大值/mg·L ⁻¹	超标率/%	影响率/%
单节	东北地山丘陵	2	19.30	21.04	34.18	50.00	100.00
	东北丘陵漫岗	32	6.28	16.14	74.42	15.63	17.39
	中部漫川漫岗	33	7.41	17.61	91.82	18.18	36.36
	西南平川漫岗	39	1.39	4.19	23.80	2.56	12.82
	总计	106	5.08	13.89	91.82	12.26	25.47
多节	东北地山丘陵	2	44.24	14.09	54.20	100.00	100.00
	东北丘陵漫岗	14	27.49	22.83	66.17	71.43	78.57
	中部漫川漫岗	18	33.25	27.71	112.92	94.44	94.44
	西南平川漫岗	17	34.65	27.39	80.86	76.47	76.47
	总计	51	32.57	25.88	112.92	82.35	84.31

更频繁有关;而西南平川漫岗农业区污染状况主要与水井管道材料有关,其中单节管道水井硝态氮污染状况较轻;东北丘陵漫岗农业区污染状况介于前2个区域之间,是多种因素综合影响下的结果.

2.2.2 水井深度对硝态氮含量影响

由于不同管道构造水井对硝态氮含量影响较大,在研究水井深度对硝态氮含量影响时,将水井按管道构造和水井深度分为4类:单节管道浅井、单节管道深井、多节管道浅井和多节管道深井.

从表4可以看出,在单节管道水井中,浅水井硝态氮平均含量、超标率、影响率均低于深水井,多节管道水井方面,浅井污染程度高于深水井.对4种类

型井做多重方差分析,同样管道类型的深水井、浅水井在 $p = 0.05$ 水平下无显著性差异,表明在整个地区,井的绝对深度与硝态氮含量并无显著相关性.尤其是单节管道水井,深水井污染程度甚至高于浅水井,这与一般研究结果不符^[1, 18],可能是因为研究地区水文地质构造复杂,不同的村庄不同的打井位置地下水埋深不同,绝对的水井深度并不能反映水井地下水体所属含水岩层种类.此外,其他如气候、人类活动干扰强度不同对地下水水质也有影响,使得该地区表现出单节管道深水井硝态氮污染状况比浅水井严重的现象.

为排除不同管道材料、人类活动影响以及其他

表4 不同管道材料不同深度的水井硝态氮污染状况¹⁾

Table 4 Nitrate contamination of wells with different pipe material and well depth

水井类型	样本数	平均含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	超标率/%	影响率/%
单节-浅井	43	4.07	10.40	54.82	11.63	20.93
单节-深井	58	6.23	16.48	91.82	13.79	31.03
多节-浅井	30	39.68	26.78	112.92	93.33	93.33
多节-深井	15	25.22	22.63	72.33	73.33	80.00

1)根据当地情况分类,深度 $\leq 25\text{ m}$ 为浅井, $> 25\text{ m}$ 为深井

气候、地理单元对硝态氮含量的影响,笔者在研究区选择了28个村庄取不同深度同一管道类型井各一个,共56个水样,其中多节管道有8个村庄,单节管道20个村庄,对浅井与深井分布做成对 t 检验分析.

由表5可以看出,在同样水井管道类型以及其

他条件相近的情况下,水井深度显著影响硝态氮含量,水井越深,硝态氮含量越小,受污染程度越低.说明在整个区域,地下水硝态氮污染程度与水井的绝对深度并无显著关系,但在其他条件都近似的条件下,水井的深度与硝态氮污染程度呈显著的负相关.

表5 相近地理单元不同深度水井硝态氮污染状况¹⁾

Table 5 Nitrate contamination of wells with different depth under similar geographical condition

管道类型	水井类型	样本数	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差	超标率/%	t (深-浅)	p
多节	深井	8	25.14	21.42	75.00	-2.241	0.037
	浅井	8	45.61	15.45	100.00		
单节	深井	20	1.84	5.26	5.00	-2.634	0.034
	浅井	20	12.02	21.23	35.00		

1)根据村庄水井相对深度,相对深度大的为深井,相对较浅的为浅井

2.2.3 农业活动和人类活动对硝态氮污染的影响

研究区为典型的农业区,地下水硝态氮污染主要来源于农业生产和其它人类活动影响.本研究以化肥施用量代表农业活动强度,由于该区农家肥施用量不高,农户对农家肥的处理方式为随地堆放,因此选取户均家禽牲畜量代表其它人类活动影响,分析硝态氮污染的空间分布特征.在研究区以乡镇为单位,根据统计年鉴上化肥施用量、年初耕地面积、牲畜量、农户数等数据计算得到各乡镇单位面积氮肥施用量、户均牲畜量,并利用软件 Arcgis9.0 做成空间分布图.其中:单位面积氮肥施用量(kg/hm^2) =

总氮肥施用量(kg)/年初耕地面积(hm^2);牲畜量根据不同畜禽产生粪便量以及粪便含氮量不同,用猪作为单位牲畜代表^[25],户均牲畜量(头/户) = 牲畜量(头)/农户数(户).

由前面分析获知,单节管道水井与多节管道水井污染状况存在显著差异,因此在分析水井与氮肥施用量、户均牲畜量关系时,将其分开进行讨论.如图2、图3所示,单节管道硝态氮污染主要分布在扎音河、海伦河、靛鞑沟子3个流域上游,而其中污染最严重的区域位于扎音河流域上游,硝态氮含量最高达到 $74.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,该区氮肥施用强度和户均家

禽牲畜量均比较高,位于海伦河流域上游以及靛鞞沟子流域上游的区域硝态氮含量多处于 2.00 ~ 10.00 mg·L⁻¹之间,已受到人类活动的影响,处于污染超标潜在危险状态,该区氮肥施用量也较高,但户均牲畜量较低.多节管道水井地下水硝态氮在区域内污染都较为严重,从空间上来看,污染最为严重的

区域同样位于扎音河流域上游,硝态氮含量最高达到 66.17 mg·L⁻¹,而其他污染比较严重的区域同样包括海伦河流域上游、靛鞞沟子流域上游,与单节管道水井污染状况相似,此外,地区西南部多节管道水井污染同样比较严重,此区域施肥量相对不高,但户均家禽牲畜量较高.

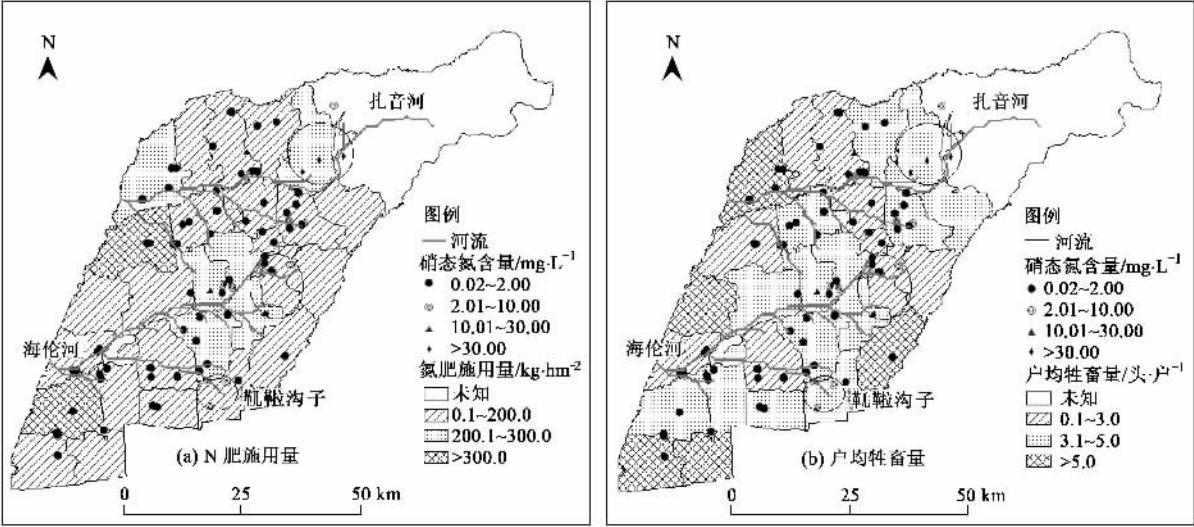


图 2 单节管道水井硝态氮含量与氮肥施用量、户均家禽牲畜空间分布
Fig.2 Distribution of nitrate content of seamless-pipes wells with nitrogen fertilizer and household livestock, poultry

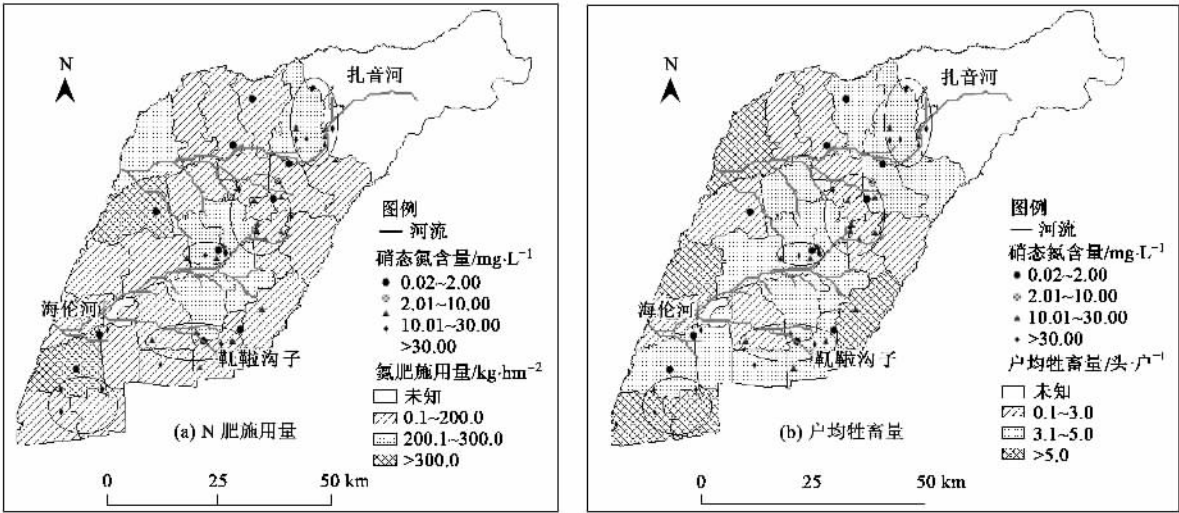


图 3 多节管道水井硝态氮含量与氮肥施用量、户均家禽牲畜量空间分布
Fig.3 Distribution of nitrate content of multiple-section-pipes wells with nitrogen fertilizer and household livestock, poultry

3 建议

针对该地区地下水硝态氮污染严重,建议从控制污染源与污染途径 2 个方面解决.①在污染源上,应针对研究地区牲畜粪便、生活垃圾随意堆放的现状,对村庄附近的农田积极推广施用农家肥,一方面

可以降低化肥投入的成本,另一方面有助于防治非点源污染,尤其是对地下水的污染;②提高化肥利用率也是降低化肥对地下水污染的重要途径.比如在化肥里添加硝化抑制剂,根据作物需要控制施肥量,农家肥和化肥混合施用等措施均对提高化肥利用率有一定的作用^[7];③在水井本身性质即污染途径上,

饮用水井宜采用单节材料作水井管道,如塑料、铁管等,而针对各户建造深水井成本较高,应以村庄为单元,集中建造深水井提供自来水模式,保证该区饮用水安全.总之,本区地下水中硝态氮污染状况由多种因素综合作用造成,对于不同村庄单元地下水硝态氮污染现状,改变水井性质,更换水井管道材料或集体建造深水井是最快速有效的方式,而增加化肥利用效率,减少牲畜粪便随处堆放需要一个长期的过程,但这却是从根本上解决硝态氮污染问题的关键.

4 结论

(1)研究地区地下水硝态氮污染严重,平均浓度达到 $14.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超标率达到 26.11%.在空间上污染程度由高到低依次为中部漫川漫岗农业区、东北丘陵漫岗农业区和西南平川漫岗农业区.

(2)水井管道构造与井水硝态氮污染具有密切相关关系,其中多节管道硝态氮污染状况比单节管道水井显著严重.

(3)水井深度成为硝态氮污染的重要因素.虽然在整个区域上由于各处地下水位埋深不同,硝态氮污染与各地绝对深度关系并不显著,但在同一地理单元以及人类活动强度影响下,硝态氮与水井深度呈显著的负相关关系.

(4)硝态氮含量超标较严重区域均位于氮肥施用量或者户均牲畜量较高的地区,污染最严重的扎音河上游东方红水库周边则属于氮肥施用量与户均牲畜量均比较高的地区.

致谢:感谢中国科学院海伦农业生态试验站的韩晓增站长、崔云旺副站长、乔云发老师在实验分析过程中提供平台和帮助.

参考文献:

[1] Townsend M A, Young D P. Assessment of Nitrate-Nitrogen Distribution in Kansan Groundwater, 1990-1998 [J]. Natural Resources Research, 2000, **2**(9):125-133.

[2] Chen J Y, Taniguchi M, Liu G Q, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in the Yellow River delta, China [J]. Hydrogeol J, 2007, **12**(15):1605-1614.

[3] Aldwell C R, Burdon D J, Sherwood M. Impact of agriculture on groundwater in Ireland [J]. Environ Geol, 1983, **5**:39-48.

[4] Rajmohan N, Elango L. Nutrient chemistry of groundwater in an intensively irrigated region of southern India [J]. Environ Geol, 2005, **47**:820-830.

[5] Muller D K, Helsel D R. Nutrients in the Nation's Waters-Too Much of a Good Thing? [R]. USGS National Water-Quality Assessment Program Circular, 1996. 1136.

[6] US Environmental Protection Agency Environmental indicators of

water quality in the United States [R]. US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1996. 25.

[7] Kumazawa K. Nitrogen fertilization and nitrate pollution in groundwater in Japan: Present status and measures for sustainable agriculture [J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2002, **63**:129-137.

[8] LaMotte A E, Greene E A. Spatial analysis of landuse and shallow groundwater vulnerability in the watershed adjacent to Assateague Island National Seashore, Maryland and Virginia, USA [J]. Environ Geol, 2007, **52**:1413-1421.

[9] 刘宏斌,李志宏.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报, 2006, **43**(3):405-413.

[10] 刘翔,刘兆昌,朱琨.氮对地下水的污染预测模型[J].环境科学, 1991, **12**(6):8-11.

[11] 李正兆,高海鹰,张奇,等.抚仙湖流域典型农田区地下水硝态氮污染及其影响因素[J].农业环境科学学报, 2008, **27**(1):286-290.

[12] 张燕,陈英旭,陈光浩.化学反硝化去除硝酸盐的试验研究[J].环境科学, 2003, **24**(4):109-112.

[13] 陈克亮,朱晓东,朱波,等.川中小流域地下水硝态氮的时空变化特征[J].农业环境科学学报, 2006, **25**(4):1060-1064.

[14] 张云,张胜,荆继红,等.地下水氮污染治理的探索试验[J].地球学报, 2006, **27**(3):283-288.

[15] 张大鹏,孙宏亮,胡博.浅论地下水中的氮污染[J].地下水, 2007, **29**(1):68-71.

[16] 张庆乐,王浩,张丽青,等.饮水中硝态氮污染对人体健康的影响[J].地下水, 2008, **30**(1):57-60.

[17] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社, 2002. 266-268.

[18] 刘宏斌,张云贵,李志宏,等.北京市平原地区深层地下水硝态氮污染状况研究[J].土壤学报, 2005, **42**(3):411-418.

[19] 中国科学院黑龙江省海伦县自然资源综合考察队.海伦县自然资源综合考察报告[R].黑龙江:1978. 228-241.

[20] Goss M J, Barry D A, Rudolph D L. Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture: 1. Results from drinking water wells [J]. J Contam Hydrol, 1998, **32**(3-4):267-293.

[21] 袁新民,王周琼.硝态氮的淋洗及其影响因素[J].干旱区研究, 2000, **17**(4):46-52.

[22] De Ruijter F J, Boumans L J, Smit A L, *et al.* Nitrate in upper groundwater on farms under tillage as affected by fertilizer use, soil type and groundwater table[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2007, **77**:155-167.

[23] Kulabako N R, Nalubega M, Thunvik R. Study of the impact of land use and hydrogeological settings on the shallow groundwater quality in a peri-urban area of Kampala, Uganda[J]. Sci Total Environ, 2007, **381**(1-3):180-199.

[24] 沃飞,陈效民,吴华山,等.太湖流域典型地区农村水环境氮、磷污染状况的研究[J].农业环境科学学报, 2007, **26**(3):819-825.

[25] 李帷,李艳霞,张丰松,等.东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[J].农业环境科学学报, 2007, **26**(6):2350-2357.