

北京市集约化农区地下水硝酸盐含量变化分析

李文娟^{1,2}, 赵同科^{2*}, 张成军², 李 鹏², 杨金凤²

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要:为分析和评价北京市地下水硝酸盐污染状况,以北京市集约化农区13个郊区县为研究对象,采集2005—2012年地下水样本,分析测定其 NO_3^- -N含量。结果表明,地下水 NO_3^- -N平均含量为 $6.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年际均值在 $5.85 \sim 6.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,符合国家地下水质量标准(GB/T 14848-93)的Ⅲ类水质标准,超标率($>10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和严重超标率($>20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别为19.36%和6.73%。地下水 NO_3^- -N含量雨季前后略高于雨季前;不同作物种植区地下水 NO_3^- -N平均含量顺序为蔬菜种植区>粮食作物区>其他作物区>果树种植区,均值分别为 7.66 、 6.15 、 $5.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NO_3^- -N含量随地下水埋深增加呈明显下降趋势。

关键词:集约化农区;地下水;硝酸盐含量;北京市

中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)07-1445-06 doi:10.11654/jaes.2013.07.23

Nitrate Contamination of Groundwater Under Intensive Agricultural Regions of Beijing

LI Wen-juan^{1,2}, ZHAO Tong-ke^{2*}, ZHANG Cheng-jun², LI Peng², YANG Jin-feng²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Groundwater samples were collected from intensive agricultural regions of 13 districts in Beijing from 2005 to 2012 to determine the status of nitrate nitrogen(N) contamination in groundwater. The results indicated that the mean concentration of nitrate-N of all samples analysed in Beijing was $6.34 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{L}^{-1}$. There were 19.36% of the samples exceeding $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and 6.73% of the samples exceeding $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The annual average concentration of nitrate-N varied from $5.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $6.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which met the category III national water quality standard. Nitrate leaching was enhanced by rainfall and higher concentrations of nitrate-N in groundwater were observed after rainy seasons. The nitrate-N concentration in groundwater was affected by the land use system in the following order: vegetable field>arable cropping>other land uses>orchards, with the mean nitrate-N concentration being $7.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $6.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $5.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $4.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The nitrate-N concentration in groundwater decreased with increasing groundwater depth, and the average concentration within 30 m was $12.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, exceeding the WHO drinking water guideline.

Keywords: intensive agricultural region; groundwater; nitrate nitrogen contamination; Beijing

目前全球可供人类使用的淡水资源中,68%来自地下水^[1]。长期以来由于人类在发展社会经济的同时,缺乏对环境保护的足够重视,造成地下水污染越来越严重,成为国际上普遍关注的水环境问题之一,过量硝酸盐是造成地下水污染的重要物质。近年来的监测

结果显示,地下水硝酸盐的浓度正在逐年增加,美国、加拿大、日本和欧洲均有类似的报道^[2-4]。我国许多地区也在不同程度上受到了硝酸盐的污染,一些地区甚至已到了较为严重的程度。造成地下水硝酸盐污染的原因较多,农业生产中过量施用氮肥是其中的重要原因^[5-9]。1978年以来我国50个城市地下水水质的监测结果表明,已有21个城市的地下水受到不同程度的硝酸盐污染,特别是北方的以地下水为主要供水水源的大城市^[7]。张维理等通过对我国北方14个县市的69个调查点的水质监测发现,半数以上超过饮用水硝酸盐的最大允许量,有的甚至高达 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[5]。环渤海七省市地下水硝酸盐含量调查结果显示,地下水中

收稿日期:2013-01-09

基金项目:农业部农业生态环境保护项目——华北地区大中城市郊区农业生产区域地下水硝酸盐监测与评价(2110402-201258);IPNI中国项目“北京市菜田土壤养分优化管理研究与示范”

作者简介:李文娟(1980—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事信息与农业环境研究。E-mail:liwenjuan090@163.com

*通信作者:赵同科 E-mail:tkzhao@126.com

NO_3^--N 的含量较高,平均值达到 $11.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,约34.1%的地下水超过世界卫生组织(WHO)制定的饮用水标准^[8]。近年来天津、辽宁、山东等很多地区相继报道了地下水硝酸盐污染较为严重的现象^[9-11]。

北京市以地下水作为主要的供水水源,地下水供水量占全市总供水量的 $2/3$ ^[12],地下水中硝酸盐含量超标将直接危害到全市人民的健康。刘宏斌等指出,当前北京市深层地下水硝态氮污染程度已接近甚至超过欧美国家,浅层地下水更为严重^[13]。目前,北京市已有 49.7%的饮用水受到人类活动的影响^[14]。为此,本研究以北京市集约化农区为研究区域,在大量调查、取样基础上,分析地下水中硝酸盐含量的变化规律,以期北京市水资源的合理利用与保护、居民的饮水安全与防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于华北平原西北边缘,地跨北纬 $39^\circ28'$ 至 $41^\circ05'$,东经 $115^\circ25'$ 至 $117^\circ30'$,总面积 1.68 万 km^2 。全市地形西北高,东南低,东南为倾斜的平原,2008 年总耕地面积为 23.2 万 hm^2 。全境属暖温带大陆季风型气候,四季分明,多年平均气温为 13°C ,年降水量

为 $300\sim720 \text{ mm}$,主要的农田利用类型有粮田、菜地、果园等。本文以北京市集约化农区为研究区域,包括 3 个近郊区:朝阳、海淀、丰台区,8 个远郊区:门头沟、房山、通州、顺义、昌平、大兴、平谷和怀柔区,2 个郊县:密云、延庆县。

1.2 样品的采集与测定

2005 年 5 月至 2012 年 5 月,在北京市 13 个郊区县集约化农区选择粮田、蔬菜、果树等种植区域为调查对象,依据代表性、可控性、经济性及可行性原则,兼顾地理位置的均匀性,按照作物种植类型在大面积、代表性作物种植区周边设有水井的地点布设采样点,采样点分布状况见图 1。于每年雨季前后(5 月、10 月)各取 1 次水样,样品共计 5218 个。

利用 GPS 精确定位,填写登记表,注明编号、地点、采样时间、井深、周围主要种植作物等相关说明,完成样品采集后带回实验室放入冰箱冷冻待测定。测定时先解冻,若有浑浊则用滤纸过滤直至澄清,用紫外分光光度计法测定水样中的 NO_3^--N 含量^[15]。

1.3 评价标准

目前国内外对于饮用水中硝酸盐含量的评价标准并不统一,WHO《饮用水水质标准》中硝酸盐的最大允许含量规定为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (折合为 NO_3^--N 11.3

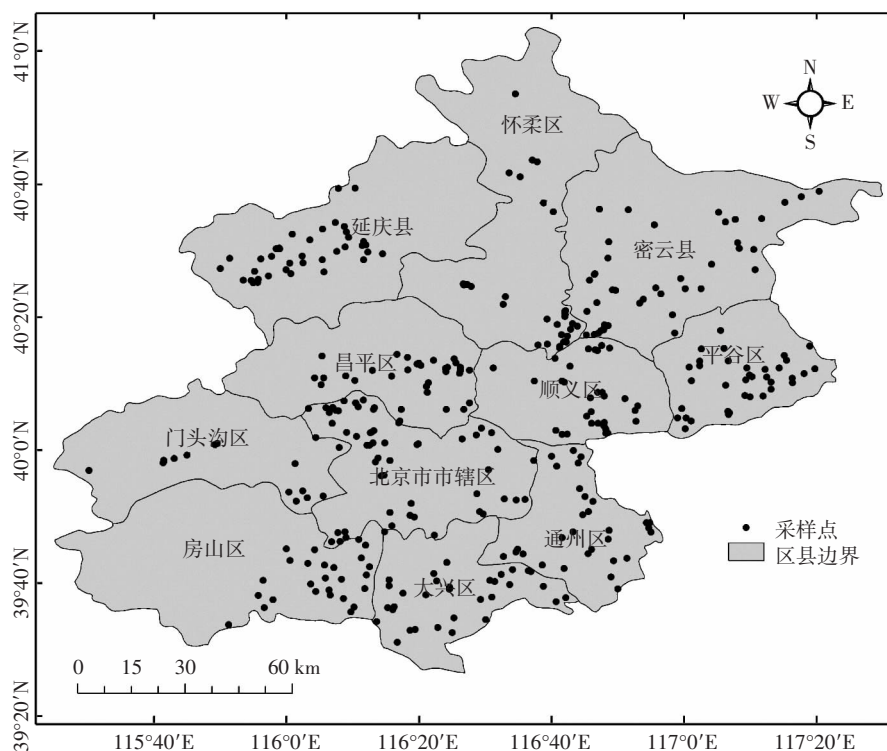


图1 北京市集约化农区地下水采样点分布示意图

Figure 1 The location of groundwater sampling sites in intensive agricultural region in Beijing

mg·L⁻¹),美国的饮用水中 NO₃-N 含量的最大允许值为 10 mg·L⁻¹。我国地下水质量标准(GB/T 14848—1993)中规定了硝酸盐(以 NO₃-N 计,mg·L⁻¹)的分级标准:≤2.0 为Ⅰ类水,≤5.0 为Ⅱ类水,≤20 为Ⅲ类水,≤30 为Ⅳ类水,>30 为Ⅴ类水,其中集中式生活饮用水应符合Ⅲ类以上标准,即 NO₃-N 含量不超过 20 mg·L⁻¹。生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)也规定,地下水源饮用水中 NO₃-N 含量的限值应不超过 20 mg·L⁻¹。本文采用我国地下水质量标准(GB/T 14848—1993)对所研究地区地下水 NO₃-N 含量进行分类,同时采用 10 mg·L⁻¹ 作为饮用水中 NO₃-N 含量的限定标准进行评价,NO₃-N 含量>20 mg·L⁻¹ 为严重超标。

2 结果与讨论

2.1 地下水硝酸盐含量总体状况

2005—2012 年地下水硝酸盐含量监测数据表明,北京市集约化农区地下水中 NO₃-N 含量变化范围为 0~82.40 mg·L⁻¹,平均值为 6.34 mg·L⁻¹,其中约 19.36%的地下水样本超过饮用水限定标准(10 mg·L⁻¹),约 6.73%的地下水样本严重超标(超过 20 mg·L⁻¹)。根据我国地下水质量标准(GB/T 14848—1993),以水中 NO₃-N 含量衡量,北京市集约化农区地下水水质达标率为 93.27%,其中Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类水分别为 40.25%、23.57%、29.46%、3.39%、

3.34%。这说明目前北京市地下水整体质量良好,但由于Ⅲ类水已经高达 29.46%,潜在污染风险较大,如不及时控制,这部分水很容易向Ⅳ类水转化。

2.2 地下水硝酸盐含量的年际变化

如表 1 所示,2005—2012 年北京市集约化农区地下水 NO₃-N 年际均值在 5.85~6.93 mg·L⁻¹ 之间,低于饮用水的限定标准(10 mg·L⁻¹),稳定处于我国地下水质量标准(GB/T 14848—1993)的Ⅲ类水质标准。NO₃-N 含量高于 20 mg·L⁻¹ 水样所占比例于 2005—2012 年间波动不大,最高时达 7.52%,最低时为 5.42%。

2.3 不同监测时期地下水硝酸盐含量的变化

降雨影响土壤中 NO₃-N 的淋溶和地下水的补给,从而影响地下水中 NO₃-N 的含量。从表 2 可以看出,北京市集约化农区地下水中 NO₃-N 含量在不同监测时期有明显差异,雨季后的 NO₃-N 含量平均值略高于雨季前,NO₃-N 含量的变化范围则是雨季前大于雨季后。与雨季前相比,雨季后Ⅰ类水所占比例大幅下降,Ⅱ、Ⅲ类水所占比例上升,Ⅳ、Ⅴ类水所占比例相差不大。这可能与北京市降雨特点和灌溉方式有关,北京市的降雨频率较低且雨量偏小,较难形成地表径流,对地下水中 NO₃-N 的稀释不明显,而近年来长期过量施用氮肥致使土壤中氮素含量过高,采用大水漫灌使得 NO₃-N 的渗漏作用增强,导致地下水 NO₃-N 含量升高。林海涛等的研究结果表明,受到雨

表 1 2005—2012 年地下水 NO₃-N 含量的统计分析
Table 1 Statistical analysis of NO₃-N content in groundwater from 2005 to 2012

年份	样品数	范围/mg·L ⁻¹	均值/mg·L ⁻¹	分布频率/%				
				≤2.0(Ⅰ类)	≤5.0(Ⅱ类)	≤20(Ⅲ类)	≤30(Ⅳ类)	>30(Ⅴ类)
2005	166	0~71.87	5.85	39.16	22.89	32.53	3.01	2.41
2006	515	0~73.66	6.93	36.31	25.63	31.46	2.72	3.88
2007	841	0~73.55	6.19	40.31	25.80	27.23	2.97	3.69
2008	838	0~82.40	6.68	39.62	21.36	31.50	4.18	3.34
2009	845	0~66.20	5.88	40.47	25.80	27.46	3.43	2.84
2010	806	0~77.58	6.12	40.07	24.94	29.16	3.10	2.73
2011	815	0~63.01	6.58	43.44	18.77	30.31	3.19	4.29
2012	392	0~80.06	6.29	40.31	23.47	29.08	4.59	2.55

表 2 雨季前后地下水 NO₃-N 含量差异
Table 2 Comparisons of NO₃-N content in groundwater before and after rainy seasons

监测时期	样品数	范围/mg·L ⁻¹	均值/mg·L ⁻¹	分布频率/%				
				≤2.0(Ⅰ类)	≤5.0(Ⅱ类)	≤20(Ⅲ类)	≤30(Ⅳ类)	>30(Ⅴ类)
雨季前	2875	0~82.40	6.07	42.43	22.64	28.45	3.17	3.30
雨季后	2343	0~77.58	6.67	37.56	24.71	30.69	3.67	3.37

水补给的影响,雨季后地下水硝酸盐含量下降^[6]。

2006—2011年雨季后地下水中 NO_3^- -N平均含量均高于雨季前(图2),这说明降雨对土壤中 NO_3^- -N的淋溶作用大于对地下水的补给作用,使得地下水中 NO_3^- -N含量升高。从地下水 NO_3^- -N变异系数看,除2009年雨季前地下水 NO_3^- -N变异系数低于雨季后外,其余年份雨季前变异系数均高于雨季后变异系数,说明除2009年外其余年份雨季前地下水 NO_3^- -N含量数据分布具有更高的离散度。

2.4 不同作物种植区地下水中硝酸盐含量差异

受北京市农业种植结构及取样区域主导作物种植类型的影响,蔬菜种植区取样数量占总样品数的42%,其次为果树种植区,所占比例为32%,最后为粮食作物区,占19%。

不同作物种植类型的农田,施肥量差异很大,因而对地下水 NO_3^- -N含量的影响可能不同。按照蔬菜、果树、粮食作物、其他作物4种植类型对不同土地利用方式下地下水中 NO_3^- -N含量进行分类比较,结果显示,4种植类型下地下水 NO_3^- -N平均含

量差异明显(图3(a)),其顺序为蔬菜种植区>粮食作物区>其他作物区>果树种植区,平均值分别为7.66、6.15、5.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和4.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不同土地利用方式下地下水 NO_3^- -N含量分布频率差异明显(图3(b)),蔬菜种植对地下水 NO_3^- -N含量影响较大,11.22%的地下水严重超标(超过20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),部分样本 NO_3^- -N含量高达82.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。氮肥施用量大、利用率低、土壤中 NO_3^- -N累积严重可能是导致蔬菜种植区地下水 NO_3^- -N含量高的主要原因。杜连凤等^[17]对京郊地区3种典型农田系统硝酸盐污染现状调查和高新昊等^[18]对山东省农村地区地下水硝酸盐污染现状调查及评价研究也得到了相同的结论。

值得注意的是,粮食作物区地下水Ⅰ类水占30.95%,远低于其他3种植物种植区,同时Ⅲ类水高达37.90%,这主要是由于近年来粮食作物肥料使用量也逐渐加大,且以氮肥居多,超过了作物需求量,使得地下水中 NO_3^- -N含量升高。长期过量施用化肥不仅造成了经济效益的降低,而且存在很大的环境污染风险。由于大量施用氮肥引起的硝酸盐淋洗现象非常

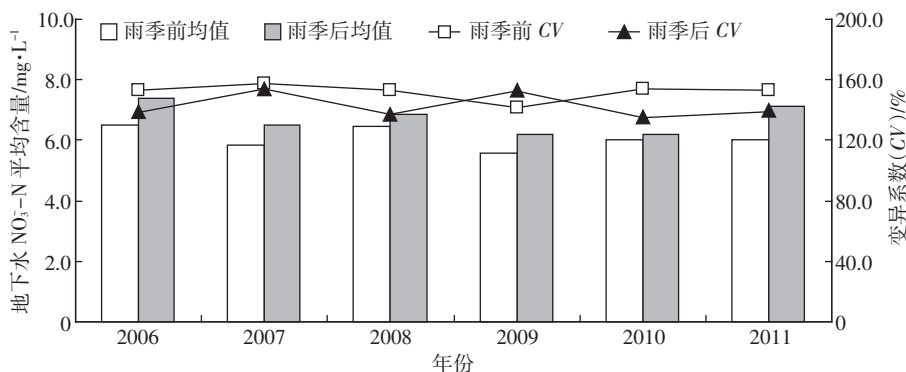


图2 2006—2011年雨季后地下水 NO_3^- -N平均含量及变异系数

Figure 2 The mean values and the variation coefficient of NO_3^- -N content in groundwater before and after rainy seasons from 2006 to 2011

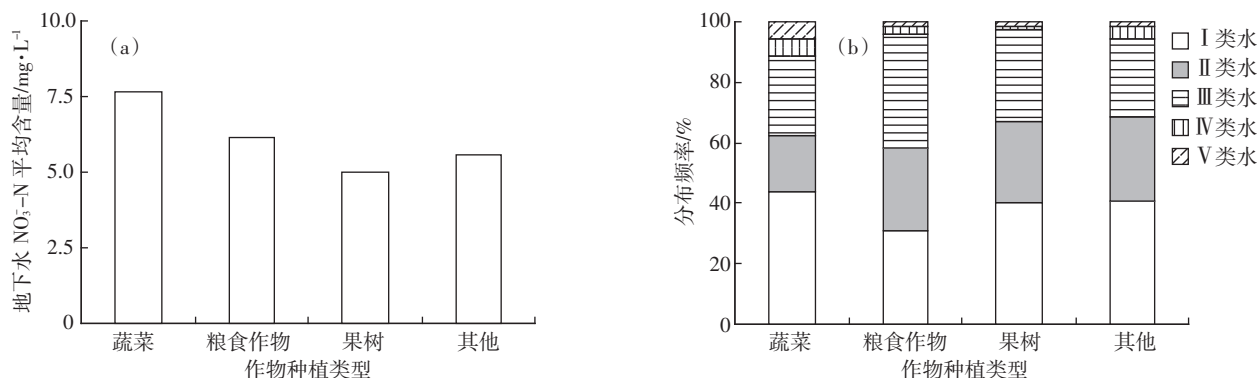


图3 不同作物种植区地下水 NO_3^- -N含量及分布频率

Figure 3 The means values and the distribution frequencies of NO_3^- -N in groundwater with different planting patterns

普遍,地下水硝酸盐污染问题日益严重,而以蔬菜种植区及其周边地区最为严重,尤其是土壤深层 NO_3^- -N 长期累积,严重威胁地下水体安全。

2.5 不同埋深地下水硝酸盐含量差异

将所取水样按地下水埋深分为3类(≤ 30 m, 30~100 m, >100 m),其 NO_3^- -N 平均含量分别为 12.71、5.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 4.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4(a)),说明北京市集约化农区地下水 NO_3^- -N 含量随地下水埋深增加呈明显下降趋势。这与赵同科等^[8]对环渤海七省市地下水硝酸盐含量调查和刘兴权等^[19]对山东省种植区地下水硝酸盐污染空间变异及分布规律研究结论一致。当地下水位 ≤ 30 m 时, NO_3^- -N 平均含量为 12.71 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于世界卫生组织制定的饮用水水质标准,其中 40.90% 的样点 NO_3^- -N 浓度超过 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,22.61% 的样点 NO_3^- -N 浓度超过 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可见北京市地下水硝酸盐污染已经严重影响到埋深 30 m 以内的水体。从变异系数来看,埋深 ≤ 30 m 地下水中 NO_3^- -N 含量多年变异性较小,说明埋深 ≤ 30 m 地下水硝酸盐污染情况比较普遍;30~100 m 和 >100 m 地下水中 NO_3^- -N 含量多年变异性较大,说明埋深 >30 m 的地下水中

NO_3^- -N 含量地区差异性明显,这与采样点附近农田作物种植类型密不可分。

从图 4(b)可看出,埋深 ≤ 30 m 地下水 I 类水仅有 19.98%,高达 22.61% 的地下水不能直接饮用。随着地下水埋深的增加, I 类水所占比例大幅提高, II 类和 III 类水所占的比例变化不大,而 IV 类和 V 类水所占的比例逐渐下降。这说明随着水体深度的增加,地下水硝酸盐污染程度越轻,水质也越好。

3 结论

(1)总体看来,北京市集约化农区地下水 NO_3^- -N 含量变化范围为 0~82.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 6.34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低于世界卫生组织制定的饮用水水质标准;年际均值在 5.85~6.93 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,稳定处于国家地下水质量标准(GB/T 14848—1993)的 III 类水质标准;超标率(>10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和严重超标率(>20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)分别为 19.36%、6.73%。

(2)不同监测时期地下水 NO_3^- -N 含量不同,雨季后略高于雨季前,雨季后 I 类水所占比例下降, II、III 类水所占比例上升。 NO_3^- -N 含量随地下水埋深增加呈明显下降趋势,埋深 ≤ 30 m、30~100 m、 >100 m 的地下水中 NO_3^- -N 平均含量分别为 12.71、5.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 4.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(3)不同作物种植区地下水 NO_3^- -N 平均含量差异明显,其顺序为蔬菜种植区 $>$ 粮食作物区 $>$ 其他作物区 $>$ 果树种植区,均值分别为 7.66、6.15、5.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 4.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。蔬菜种植对地下水 NO_3^- -N 含量影响较大,粮食作物区地下水存在硝酸盐污染的潜在威胁。

地下水硝酸盐含量主要与自然因素(地形地貌、水文地质、降雨)和人为因素(灌溉、施肥)有关,应结合地形、地质、降雨、施肥、灌溉、土壤类型、土地利用类型等因素的影响进行综合分析;考虑到地下水是流动的,还应加强地下水硝酸盐含量时空动态变化规律的研究,这对于北京市水资源的合理利用与保护、居民的饮水安全与防控具有重要的现实意义。由于本文受限于资料的可获得性,收集整理研究区的地理数据和统计资料尚需在以后的科学研究中予以完善。

致谢:北京市各郊区县农科所、农业技术推广站为北京市郊区地下水样采集提供的宝贵支持,特此致谢。

参考文献:

- [1] 张洪,王五一,李海蓉,等.地下水硝酸盐污染的研究进展[J].水资源保护,2008,24(6):7-11,67.

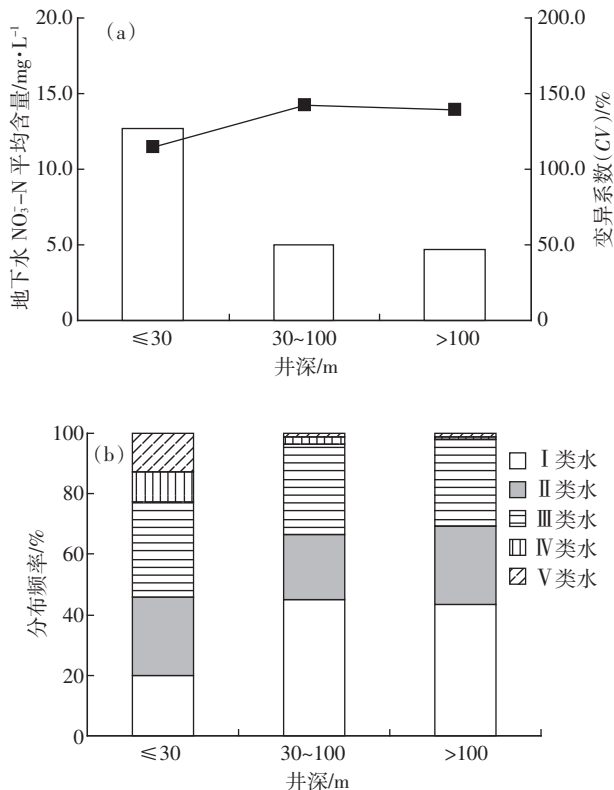


图4 不同埋深地下水中 NO_3^- -N 平均含量、变异系数及分布频率

Figure 4 The mean values, variation coefficients and distribution frequencies of NO_3^- -N with different depths of groundwater

- ZHANG Hong, WANG Wu-yi, LI Hai-rong, et al. Review of research on nitrate pollution in groundwater[J]. *Water Resources Protection*, 2008, 24(6):7-11, 67.
- [2] Ridley A M, Mele P M, Beverly C R. Legume-based farming in southern Australia: Developing sustainable systems to meet environmental challenges[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(8):1213-1221.
- [3] Goss M J, Barry D A J, Rudolph D L. Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture: 1. Results from drinking water wells[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 32(3):267-293.
- [4] Overgaard K. Trends in nitrate pollution of groundwater in Denmark[J]. *Nordic Hydrology*, 1984, 15(4):177-184.
- [5] 张维理, 田哲旭, 张 宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥科学报, 1995, 1(2):80-87.
- ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(2):80-87.
- [6] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究 [J]. 植物营养与肥科学报, 1998, 4(1):8-15.
- LÜ Dian-qing, TONG Yan-an, SUN Ben-hua. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1998, 4(1):8-15.
- [7] 童桂华. 去除地下水硝酸盐 PRB 介质试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- TONG Gui-hua. Study on reduction of nitrate from groundwater with ion exchange resin as the reactive media in permeable reactive barrier[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [8] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 等. 环渤海七省市地下水硝酸盐含量调查 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):779-783.
- ZHAO Tong-ke, ZHANG Cheng-jun, DU Lian-feng, et al. Investigation on nitrate concentration in groundwater in seven provinces (city) surrounding the Bo-Hai Sea[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):779-783.
- [9] 王正祥, 高贤彪, 李明悦, 等. 天津市水体硝酸盐污染调查与空间分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):592-596.
- WANG Zheng-xiang, GAO Xian-biao, LI Ming-yue, et al. Investigation and spatial distribution on nitrate contamination in water of Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):592-596.
- [10] 汪 仁, 解占军, 华利民, 等. 辽宁省粮食蔬菜主产区地下水硝酸盐含量调查分析[J]. 土壤通报, 2008, 39(4):928-931.
- WANG Ren, XIE Zhan-jun, HUA Li-min, et al. Investigation of nitrate content in underground water in main production regions of foodstuff and vegetable of Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4):928-931.
- [11] 董章杭, 李 季, 孙丽梅. 集约化蔬菜种植区化肥施用对地下水硝酸盐污染影响的研究——以“中国蔬菜之乡”山东省寿光市为例 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1139-1144.
- DONG Zhang-hang, LI Ji, SUN Li-mei. Nitrate contamination in the groundwater of intensive vegetable cultivation areas in Shouguang City, Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1139-1144.
- [12] 姜体胜, 杨忠山, 黄振芳, 等. 北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4):33-37.
- JIANG Ti-sheng, YANG Zhong-shan, HUANG Zhen-fang, et al. Trend and mechanism analysis of total hardness in shallow groundwater in the suburb of Beijing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(4):33-37.
- [13] 刘宏斌, 李志红, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝酸盐污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):405-413.
- LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):405-413.
- [14] 吴 琼, 杜连凤, 赵同科, 等. 菜地硝酸盐累积现状、影响及其解决出路[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2):118-122.
- WU Qiong, DU Lian-feng, ZHAO Tong-ke, et al. The present situation, influences and solutions about nitrate accumulation of vegetable plot[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2):118-122.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agriculture chemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 林海涛, 江丽华, 宋效宗, 等. 山东省地下水硝酸盐含量状况及影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):353-357.
- LIN Hai-tao, JIANG Li-hua, SONG Xiao-zong, et al. Nitrate concentration of groundwater and its affecting factors in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):353-357.
- [17] 杜连凤, 赵同科, 张成军, 等. 京郊地区 3 种典型农田系统硝酸盐污染现状调查[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8):2837-2843.
- DU Lian-feng, ZHAO Tong-ke, ZHANG Cheng-jun, et al. Investigation on nitrate pollution in soils, ground water and vegetables of three typical farmlands in Beijing region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8):2837-2843.
- [18] 高新昊, 江丽华, 刘兆辉, 等. 山东省农村地区地下水硝酸盐污染现状调查与评价[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1):89-93.
- GAO Xin-hao, JIANG Li-hua, LIU Zhao-hui, et al. Investigation and evaluation on nitrate contamination status of groundwater in rural areas of Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(1):89-93.
- [19] 刘兴权, 许晶玉, 江丽华, 等. 山东省种植区地下水硝酸盐污染空间变异及分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1172-1179.
- LIU Xing-quan, XU Jing-yu, JIANG Li-hua, et al. Spatial variability and distribution pattern of groundwater nitrate pollution in farming regions of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1172-1179.