

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

董章杭, 李 季, 孙丽梅

(中国农业大学资源环境学院, 北京 100094)

摘 要:本研究在典型集约化蔬菜种植区山东省寿光市展开。在不同季节对 3 个有代表性的乡镇的 653 个地下水水样的检测表明, 全年平均 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 含量高达 $22.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超出我国饮用水标准的水井比例为 36.5%, 超出最高允许含量 (MAC, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的水井比例达 59.5%, 可见寿光市地下水受硝酸盐污染十分严重, 污染范围相当广泛。硝态氮 ($\text{NO}_3^- \text{--N}$) 含量最大值出现在 9 月份, 最小值出现在 4 月份, 同时表现复杂的时空动态变化特征。全年 2 次对不同蔬菜种植区 262 个农户蔬菜施肥水平的调查显示, 地下水硝酸盐含量与同区氮肥施用水平呈正相关, 氮肥过量施用是造成地下水硝酸盐污染的根本原因。

关键词:地下水; 硝酸盐污染; 集约化蔬菜种植; 山东寿光

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)06-1139-06

Nitrate Contamination in the Groundwater of Intensive Vegetable Cultivation Areas in Shouguang City, Shandong Province, China

DONG Zhang-hang, LI Ji, SUN Li-mei

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper presents status of the nitrate contamination in groundwater in a typical intensive vegetable cultivation area, Shouguang city, Shandong province, China. Totally, 653 groundwater samples were collected at 4 sampling times in 3 representative towns. Nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{--N}$) was analyzed by using Continuous Flowing Analyzer (CFA, TRAACS-2000). It has been found that in September, December, April and July, $\text{NO}_3^- \text{--N}$ concentrations were $29.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $25.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $11.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $24.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The highest concentration was detected in September and the lowest in April, and the average value reached at $22.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In the studied year, the drinking water wells containing ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{--N}$) exceeding official standard accounted for 36.5%, while the contents of $\text{NO}_3^- \text{--N}$ of the samples exceeding the maximum acceptable concentration (MAC, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{--N}$) accounted for 59.5%. The fertilizer-N input level is the major factor affecting the nitrate pollution of groundwater. Questionnaire interviews were conducted twice separately on vegetables fertilization level by 148 and 124 farmers. It showed that the annual N rate applied on tomato, cucumber, eggplant and Chinese chive are $1\ 882.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $1\ 899.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $2\ 052.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $863.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively. As a result, $\text{NO}_3^- \text{--N}$ concentrations in groundwater for eggplant sub-area was the highest, with $37.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; and for Chinese chive sub-area was the lowest, with $12.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. On the whole, the results showed that the groundwater was severely and widely polluted due to the high application level of nitrogen fertilizer. Regional control measures must be made and implemented in this region in the later years by releasing rational environmental policies, developing alternative technologies, extending technologies package and establishing various demonstration sites.

Keywords: groundwater; nitrate contamination; intensive vegetable cultivation

收稿日期: 2005-01-16

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2002BA516A07)

作者简介: 董章杭(1977—), 男, 山东人, 博士研究生, 研究方向为农业生态环境。

联系人: 李 季 E-mail: lij@cau.edu.cn

水是人类和各种生命赖以生存的重要物质资源,但随着工农业经济的发展,地球上的水资源已十分紧张,地下水资源尤其如此。地下水被广泛应用于各种用途,是全球许多地区的唯一供水水源^[1],也是许多国家和地区的主要饮用水源^[2]。在美国,地下水提供了1/2以上人口的饮用水^[3];我国对21个省市和27个主要城市的统计表明,有1/2以上的城市以地下水为主要水源^[4]。

由于人口增长和粮食需求的增加,地下水硝酸盐污染成为全球范围内日益严重的问题^[1]。研究表明,硝酸盐是进入地下水中最频繁的污染物质^[5]。 NO_3^- 还原后生成的 NO_2^- 可引发高铁血红蛋白症,且 NO_2^- 是强致癌物亚硝胺的前体物^[6-8],因此地下水 NO_3^- 含量的超标,已引起各国学者普遍关注。20世纪60年代以来各国相继开展了地下水硝酸盐污染的研究。研究显示,美国各地的地下水均受到不同程度的硝酸盐污染^[3,5],澳大利亚各州也均检测到了较高的硝酸盐含量^[9-11]。张维理^[12]对我国北方农田地下水的监测结果显示,半数以上水样硝酸盐含量超标,一些地区的农村和小城镇由于农用氮肥的大量施用引起的地下水硝酸盐污染问题已经十分严重。

农业生产活动是地下水硝酸盐污染最主要的原因^[13,14]。农田施用化肥、养殖场畜禽粪便、含氮矿石堆场和大气沉降是农区氮的主要来源^[15],其中农田氮肥施用造成的地下水硝酸盐污染是农业面源污染的重要组成部分^[16]。蔬菜是喜肥作物也是喜硝作物,蔬菜种植中的纯氮肥施用量是普通大田作物的数倍甚至数十倍,且氮素利用率低^[17],因此集约化蔬菜种植区地下水硝酸盐污染状况更令人担忧。McLay^[18]研究指出,较严重的地下水硝酸盐污染主要与化肥施用量较高的蔬菜种植有关。蔬菜种植区的地下水硝酸盐含量明显高于粮食作物种植区或城市区域^[1]。北京郊区蔬菜地段由于大量施用化学氮肥,地下水中硝态氮的含量高达 $62\sim 120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[19]。

本研究在山东省寿光市展开,通过对不同季节对653个地下水水样的检测,旨在探讨典型集约化蔬菜种植区地下水硝酸盐的污染状况。

1 研究方法

1.1 区域选择

山东省寿光市素有“中国蔬菜之乡”之称,大面积发展蔬菜种植已有15年历史,到2002年,全市蔬菜种植面积达 5.8万 hm^2 ,占农作物播种总面积的

44.0%。寿光市地处山东半岛中部,渤海莱州湾南岸,北纬 $36^{\circ}41'\sim 37^{\circ}19'$,东经 $118^{\circ}32'\sim 119^{\circ}10'$ 之间,属暖温带季风性大陆气候。平均年降水量约 600 mm ,主要集中于6—8月份,占全年降水总量的1/2以上,春季干旱少雨,夏季湿润炎热,秋季秋高气爽,个别年份夏季风势力较强造成秋雨连绵,冬季干燥寒冷。

通过对全市水文地质、蔬菜种类、种植年限和地下水埋深等的分析,选定王高镇、古城乡和文家乡3个典型乡镇。全市共21个乡镇,该3个乡镇耕地面积占全市的11.6%,蔬菜种植面积占14.2%,年化肥施用量占12.9%,年氮肥施用量占12.2%,能较好地反映全市的蔬菜种植状况和化肥施用水平。在每个乡镇各选5个典型蔬菜种植村展开地下水 NO_3^- -N含量的研究,见图1。所选的15个村包括了该市典型蔬菜种植品种番茄、黄瓜、茄子和韭菜,种植年限在2~20年不等,区域内灌溉水井深度范围30~200 m。

1.2 地下水取样和 NO_3^- -N含量测定方法

农区地下水中 NO_3^- -N含量随时间的变化反映了许多因素,但主要是反映化学氮肥的施用时间和施用量、灌溉阶段和降水的季节变化等。本研究将取样时间确定为2003年9月下旬、2003年12月下旬、2004年4月中旬和2004年7月中旬,每次保证在2~3 d内完成全部水样采集。取样的同时用GPS测定水井所在的地理经纬度,记录井号、水井深度、水井周围区域蔬菜种植类型和种植年限等,采集的水样冰冻保存。采用连续流动分析仪(TRACCS-2000 Continuous Flow Analyzer, CFA)测定水样中 NO_3^- -N含量。考虑到检测的含量较高,事先对所取水样稀释10倍,并对略带浑浊的水样进行过滤,清亮水样直接测定。

1.3 数据分析与评价标准

所测数据使用STATA4.0统计软件和Microsoft Excel 2002进行统计分析。分别比较分析不同季节、不同施肥水平蔬菜区地下水 NO_3^- -N含量。当地下水中 NO_3^- -N含量超过 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,通常认为地下水污染是由人类活动造成的^[20,21]。国际上对饮用水中 NO_3^- -N含量的最大允许值(Maximum Acceptable Concentration, MAC)有许多标准,最常用的有2个^[18]:美国的饮用水标准,为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NO}_3^-$ -N(相当于 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NO}_3^-$);世界卫生组织(WHO)制定的饮用水标准,为 $11.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NO}_3^-$ -N(相当于 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NO}_3^-$)。医学研究表明,饮用水中硝酸盐含量超过 $90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (相当于 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NO}_3^-$ -N)时,将会危及人类健康^[12]。

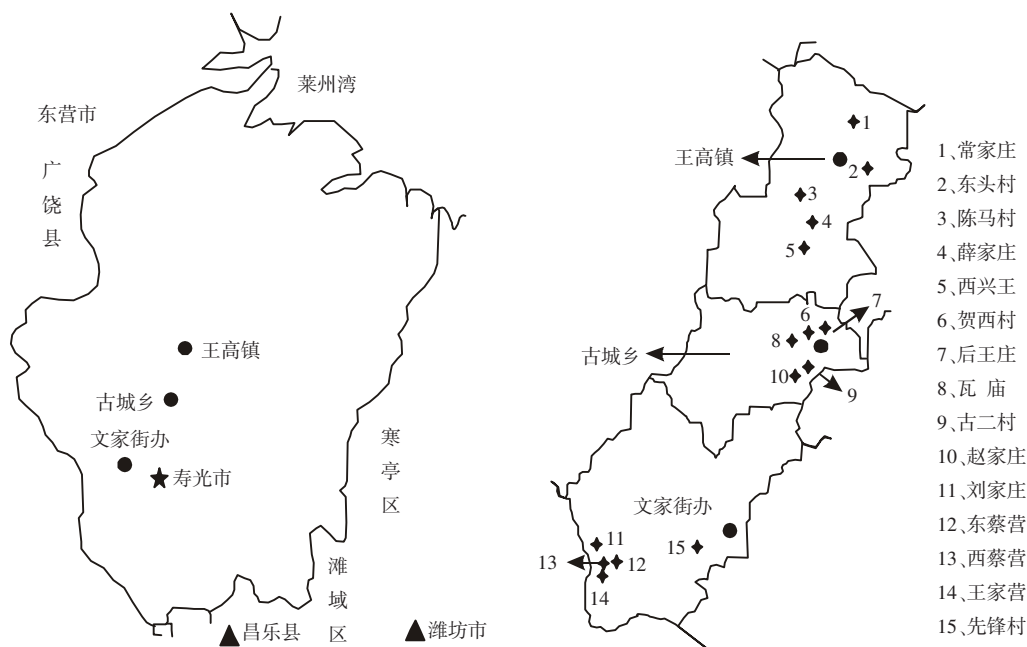


图1 研究区域乡镇、村分布图

Figure 1 Location of the studied area

我国地下水质量标准 (GB/T 14848-93) 中依据 NO_3^- -N 含量将地下水分为 5 类: I 类 ≤ 2.0 , II 类 ≤ 5.0 , III 类 ≤ 20 , IV 类 ≤ 30 , V 类 $> 30 (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$, 其中集中生活饮用水应符合 III 类以上标准, 即 NO_3^- -N 含量不超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [22, 23]。

本研究依据我国地下水标准对水井进行了分类, 其中 I、II 类水样被认为污染较轻, 而 IV、V 类水样为标准水样, 被认为污染严重。同时采用 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ -N 作为 MAC 进行评价。

2 结果与分析

2.1 研究区地下水硝态氮含量整体水平

对不同时期所取全部水样的测定和分析可见, 2003 年 9 月、2003 年 12 月、2004 年 4 月和 2004 年 7 月, 地下水 NO_3^- -N 平均含量分别为 29.2 ± 33.5 、 25.5 ± 30.9 、 11.2 ± 12.0 和 $24.6 \pm 23.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表现出较明显的季节间差异, 见表 1。早秋时期硝酸盐含量最高, 其次为冬季, 丰雨季比冬季略低, 而春季硝酸盐含量最低。9 月、12 月、7 月和 4 月分别高出 MAC 1.9、1.6、1.5 和 0.1 倍; 除 4 月份符合我国 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的饮用水标准外, 其他月份均为 IV 类水。各时期不同水井间 NO_3^- -N 含量变化范围很大, 9 月、12 月、4 月和 7 月的变异系数分别为 1.14、1.21、0.95 和 1.07, 属高变异强度。 NO_3^- -N 含量全年平均水平为 $22.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这一结果高

出我国饮用水标准, 比 MAC 高 1.2 倍。可见研究区整体上地下水 NO_3^- -N 含量超标, 地下水受硝酸盐污染严重。

从不同水井 NO_3^- -N 含量的分布区间看, 9 月、12 月和 7 月, NO_3^- -N 含量为我国 III 类和 V 类水标准的水井个数最多, 而 4 月份, II 类和 III 类水水井个数最多, 见图 2。9 月、12 月、4 月和 7 月, 达到我国饮用水标准的水井个数分别占同期水井总数的 52.0%、63.3%、84.6% 和 54.0%, 超标率为 9 月 > 7 月 > 12 月 > 4 月, 见图 3, 全年平均为 36.5%。9 月、12 月、4 月和 7 月超出 MAC 的比率分别高达 72.5%、55.6%、41.0% 和 70.7%, 全年平均为 59.5%。可见寿光市地下水硝酸盐污染已十分严重, 且污染十分广泛。目前尚未超标的水井, 也已经积累了一定浓度的硝酸盐, 若不尽快采取措施, 则污染继续加重的趋势十分明显。

2.2 不同蔬菜种植区地下水硝酸盐含量的比较分析

地下水硝酸盐污染状况受该区地上作物布局及农作物施肥水平的影响。为此, 将不同蔬菜区地下水 NO_3^- -N 含量及作物化学纯氮施用量进行比较分析, 见表 2、表 3。结果显示, 茄子区和黄瓜区地下水 NO_3^- -N 含量随季节的变化特点与全部水井整体水平基本一致, 最大值均出现在 9 月而最小值均出现在 4 月。番茄区和韭菜区有所不同, 其中番茄区最大值推迟到 12 月, 而韭菜区最大值和最小值分别出现在 7 月和

表 1 不同季节地下水 NO₃⁻-N 含量检测结果

Table 1 NO₃⁻-N concentrations in groundwater collected in different seasons

取样时间	水样个数	NO ₃ ⁻ -N 含量指标				
		平均值 /mg · L ⁻¹	最小值 /mg · L ⁻¹	最大值 /mg · L ⁻¹	标准差	变异系数
2003 年 9 月下旬	98	29.2	0.6	178	33.5	1.14
2003 年 12 月下旬	169	25.5	0	129	30.9	1.21
2004 年 4 月中旬	188	11.2	0	74.1	12.0	1.07
2004 年 7 月中旬	198	24.6	0	115	23.3	0.95
全部	653	22.6	0	178	—	—

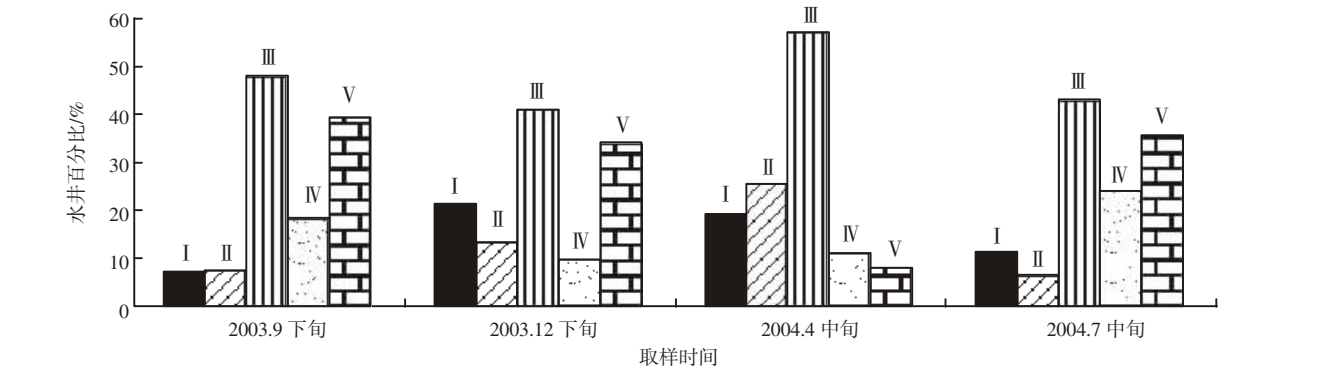


图 2 不同季节地下水水样硝酸盐含量水平(五类水)分布情况

Figure 2 Distribution of irrigation wells according to nitrate concentration in different seasons

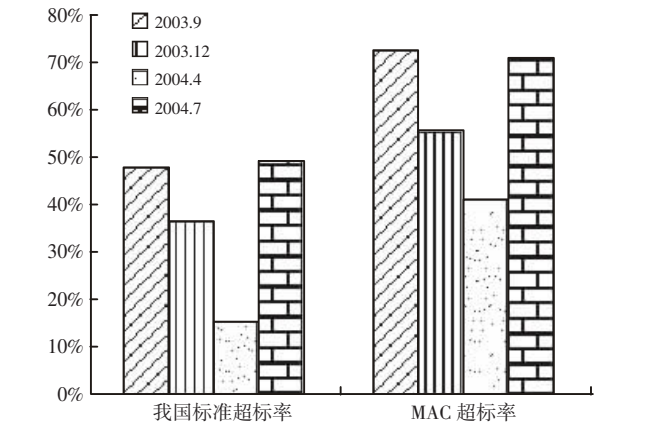


图 3 不同季节 NO₃⁻-N 含量超标水井比率

Figure 3 Percentage of wells with NO₃⁻-N concentration exceeding criteria in different seasons

12月。就全年平均地下水 NO₃⁻-N 含量而言,茄子区、番茄区、黄瓜区和韭菜区分别为 37.2、20.1、20.0 和 12.4 mg·L⁻¹, 说明茄子区地下水硝酸盐污染最重,高出Ⅲ类水标准近 1 倍,也远高于其他蔬菜区。番茄区和黄瓜区含量水平相近,均低于研究区整体水平(22.6 mg·L⁻¹),但已接近我国标准的上限,似高出 MAC 1.0 倍。韭菜区 NO₃⁻-N 含量远低于其他蔬菜区,但也高出 MAC 0.2 倍。

地下水硝酸盐污染的这种区域性差异,与不同蔬菜区的化学氮肥施用水平是一致的。2003 年 9 月、2004 年 7 月分别对 148 个和 124 个典型蔬菜种植户的问卷调查显示,茄子、番茄、黄瓜和韭菜种植上的年化学纯氮施用量分别高达 1882.8、2052.5、1843.3 和 863.0 kg·hm⁻², 茄子 N 肥施用量最高而韭菜上最低,见表 3。表明氮肥施用量与同区地下水 NO₃⁻-N 含量呈正相关。在此值得一提的是,施用的氮素中只有不被作物吸收的部分才留在土壤中,进而通过淋洗等方式进入地下水,因此蔬菜区之间氮肥施用量的差异幅度低于地下水 NO₃⁻-N 含量的差异幅度。如茄子区的 N 肥施用量比番茄区高 9.0%,但其地下水 NO₃⁻-N 含量却比番茄区高出 85.1%;表明 N 肥施用量高出的部分未被蔬菜吸收,却对地下水的污染起了明显的作用。这也说明寿光市蔬菜种植上的 N 肥施用量偏高而利用率较低。

图 4、图 5 分别给出了各蔬菜种植区水井在不同 NO₃⁻-N 含量水平的频率分布和超标比率情况。茄子、黄瓜、番茄和韭菜 4 种蔬菜区,全年平均超出我国饮用水标准的水井比例分别占同区全部检测水井的 58.3%、40.0%、26.0%和 20.2%;若以 MAC 计则超标比例分别高达 82.2%、58.6%、50.0%和 45.0%。污染特

表 3 不同蔬菜种植区化学氮肥施用水平

Table 3 Fertilizer-N inputs in different kinds of vegetable areas

蔬菜种植分区	化学纯氮施用量（农户调查）				
	农户个数	冬春茬/kg·hm ⁻²	农户个数	秋冬茬/kg·hm ⁻²	全年累计/kg·hm ⁻²
番茄种植区	49	853.9	41	1 028.9	1 882.8
茄子种植区	26	1 144.9	34	907.6	2 052.5
黄瓜种植区	21	931.8	39	961.5	1 899.6
韭菜种植区*	28	963.7a	34	762.3b	863.0c

注：* 韭菜种植不分茬口,a 为第一次调查数据,b 为第二次调查数据,c 为两次调查平均值。

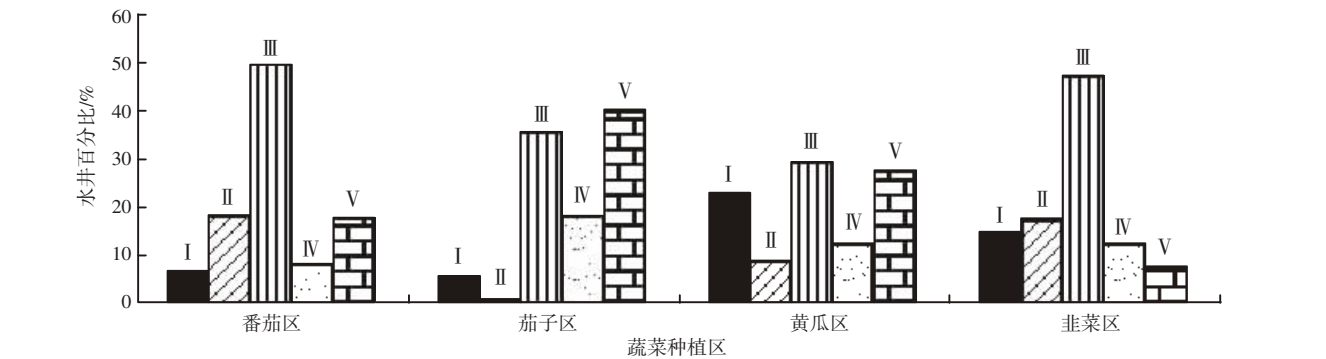


图 4 不同蔬菜区地下水 NO₃⁻-N 含量(五类水)频率分布情况

Figure 4 Distribution of irrigation wells according to nitrate concentration in different vegetable areas

别严重（V类水）的水井比例分别为 40.3%、27.8%、17.8%和 7.7%，均表现为依次降低，同样与 N 肥施用水平的依次降低相一致。这种高的超标率，表明各蔬菜区地下水受硝酸盐污染相当普遍，特别是施肥水平最高的茄子种植区的水井，绝大多数 NO₃⁻-N 含量超过允许范围。在每个蔬菜种植区，NO₃⁻-N 含量在 5~20 mg·L⁻¹（Ⅲ类）的水井均占较大比例，而水质较好的水井（Ⅰ、Ⅱ类）仅在黄瓜区和韭菜区占较大比例，番茄区和茄子区则较少，说明污染尚未超标的水井情况也不容乐观。

3 结果与讨论

经过近 20 年的集约化蔬菜种植，寿光市地下水产生了严重的硝酸盐污染，地下水 NO₃⁻-N 年平均含量高达 22.6 mg·L⁻¹，超出我国饮用水允许范围，更高出 MAC 1.26 倍。全年平均超出我国饮用水标准的水井比例为 37.3%，而超出 MAC 的比例达 59.9%，受硝酸盐污染的区域相当广泛。由于多种因素的影响，不同水井间 NO₃⁻-N 含量差异较大，变异系数为 1.0 以上，属高变异强度。同时，地下水硝酸盐污染表现出十分复杂的时空动态变化特征，并受到多种因素的交叉影响。

地下水 NO₃⁻-N 含量表现出很强的季节间波动

性。这种季节间的差异在不同蔬菜区不完全一致，但总的来看，春季远低于其他季节，而经过连续降雨后的秋季是 NO₃⁻-N 含量较高的季节。这可能主要由降水的季节性变化造成，但同时又受到不同蔬菜区农作习惯包括施肥、灌溉等因素以及土壤地质特点的影响。

农区氮肥施用量对地下水 NO₃⁻-N 含量有明显的影 响。过量施用的氮肥直接进入土壤，进一步经淋洗等过程进入地下水，是农区地下水硝酸盐污染的根本原因。氮肥施用量与同区地下水 NO₃⁻-N 含量呈正相关。茄子种植上的年纯氮施用量高达 2 052.5 kg·hm⁻²，导致该区地下水 NO₃⁻-N 含量在各季节均高于其他蔬菜区，全年平均达 37.2 mg·L⁻¹。而韭菜上的施肥量远低于其他果类蔬菜，其地下水 NO₃⁻-N 含量也相对较低。控制化肥施用、提高氮肥利用率，是防止地下水硝酸盐污染的根本途径。

农田施用的氮肥，一旦通过土壤进入地下水，则很难自然消除。地下水中的硝酸盐逐年积累并不断向下运移，含量将越来越高，污染范围将越来越大。若片面追求经济效益，过度依赖农用化肥而不顾生态承受能力，必将付出惨重的环境代价。合理进行种植结构调整，改变土地利用方式，科学轮作，实施生态农业，是缓解地下水硝酸盐污染的有效措施。

参考文献:

[1] Babiker I S, Mohamed A A, et al. Assessment of Groundwater Contamination by Nitrate Leaching from Intensive Vegetable Cultivation Using Geographical Information System[J]. *Environment International*, 2004, 29: 1009–1017.

[2] Almasri M H, J J Kaluarachchi. Implications of On–Ground Nitrogen Loading and Soil Transformations on Ground Water Quality Management[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40 (1):165–185.

[3] Nolan B T, Ruddy B C, Hitt K J, et al. Risk of Nitrate in Groundwater of the United States–A National Perspective [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(8):2229–2236.

[4] Xu F X, Lu Y S. On Nitrate Contamination of Groundwater and Set-ting Water Conservation Areas in China [J]. *Pollution Control Technology*, 1999, 12(1):20–23.

[5] Spalding R F, Exner M E. Occurrence of Nitrate in Groundwater–A Review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22:392–402.

[6] Fan A M, C C Willhite, S A Evaluation of the Nitrate Drinking Water Standard with Reference to Infant Methemoglobinemia and Potential Reproductive Toxicity[M]. *Regul Toxicol Pharmacol*, 1987, Sect 7: 135–148.

[7] Lee Y W, Dahab M F, Bogardi I.Nitrate Risk Management Under Uncertainty[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1991, 118(2): 151–165.

[8] Wolfe A H, Patz J A. Reactive Nitrogen and Human Health: Acute and Long–Term Implications[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 120–125.

[9] Keating B A, Bauld J, Hillier J, et al. Leaching of Nutrients and Pesticides to Queensland Groundwaters [A]. In: Hunter H M, Eyles A G, Rayment G E, (Eds.). *Downstream Effects of Land–use*[C]. Department of Natural Resources, *Brisbane*, 1996. 151–163.

[10] Bolger P, Stevens M. (Eds.). Contamination of Australian Groundwater Systems with Nitrate[C]. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper no. 03/99, Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra, 1999.

[11] Dillon P, Correll R, Schmidt L, et al. Case Study 1: Pasture Mixed Agriculture and Forestry–Southeast of South Australia [C]. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper no. 03/99, Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra. 1999.

[12] Zhang W L, Tian Zh X, Zhang N, 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.

[13] Kraft G J, Stites W. Nitrate Impact on Groundwater From Irrigated–Vegetable Systems in a Humid North–Central US Sand Plain[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2003, 100: 67–74.

[14] Livingston M L, Cory D C. Agricultural Nitrate Contamination of Groundwater: An Evaluation of Environmental Policy[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(6):1311–1317.

[15] Keeney D R. Sources of Nitrate to Groundwater. In: R.F. Follett (Editor). *Nitrogen Management and Groundwater Pollution*[M]. *Amsterdam*, 1989: 23–34.

[16] Kraft G J, Stites W, Mechenich D J. Impacts of Irrigated Vegetable Agriculture on a Humid North–Central U.S. Sand Plain Aquifer [J]. *Ground Water*, 1999, 37(4): 572–580.

[17] Zhang W L, Wu S X, et al. Estimation of Agricultural Non–Point Source Pollution in China and the Alleviating Strategies I: Estimation of Agricultural Non–Point Source Pollution in China in Early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008–1017.

[18] McLay C D A, Dragten R, et al. Predicting Groundwater Nitrate Concentration in a Region of Mixed Agricultural Land Use: A Comparison of Three Approaches[J]. *Environ Pollut*, 2001, 115: 191–204.

[19] Zhu Zh L. Fertilizer, Agriculture and Environment[J]. *Exploration of Nature*, 1998, 17(66):25–28.

[20] Burkart M R, Kolpin D W. Hydrologic and Land Use Factors Associated with Herbicides and Nitrates in Near–surface Aquifers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22: 646–656.

[21] Eckhardt D A V, Stackelberg P E. Relation of Ground–water Quality to Land Use on Long Island, New York[J]. *Groundwater*, 1995, 33: 1019–1033.

[22] Jin Z F, Wang F E, et al. Nitrate Pollution of Groundwater in Urban Area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 252–257.

[23] Leng J F, Cui L Y, et al. Study on Nitrate Pollution in Groundwater of Jinan City[J]. *Rural Eco–Environment*, 1998, 14(1):55–57.