

北京北运河流域平原区地下水水质空间分布特征

徐庆勇, 陈忠荣, 杨巧凤, 赵微
(北京市水文地质工程地质大队, 北京 100095)

摘要: 选取 17 项指标, 采用国标推荐的地下水水质综合质量评价方法, 评价了北京北运河流域平原区地下水水质; 在 mapGIS 中利用其空间分析功能, 采用克里格插值方法, 绘制了地下水水质空间分布图, 并分析了其空间分布特征、成因及主要影响指标。结果表明: 北京北运河流域平原区地下水水质呈现自西北向东南水质逐渐变差的特征。水质空间分布特征的形成是自然条件与人为因素耦合作用的结果。水质较差和极差区的主要影响指标有总硬度、溶解性总固体、硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮、铁和锰。

关键词: 地下水水质; 空间分布特征; 水质评价; 北运河流域

中图分类号: TV138 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)03-0061-05

Spatial distribution characteristics of groundwater quality in Beijing north canal watershed

XU Qingyong, CHEN Zhongrong, YANG Qiaofeng, ZHAO Wei
(Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100095, China)

Abstract: Groundwater quality in Beijing North Canal Watershed was evaluated by selecting seventeen indicators and taking comprehensive quality evaluation method of groundwater quality that is recommended by Chinese standard. Spatial distribution maps of groundwater quality were drawn by using spatial analysis function of map GIS and employing Kriging interpolation method, and spatial distribution characteristics, cause of characteristics and main influence indicators were analyzed. The results show that groundwater quality in Beijing North Canal Watershed takes on characteristic of gradual deterioration from northwest to southeast, which is caused by natural conditions and human factors. The main indicators of poor water quality and poor range are total hardness, total dissolved solids, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, iron and manganese.

Key words: groundwater quality; special distribution characteristics; ground water quality assessment; North canal

北运河是北京市 5 大水系中唯一发源于本市境内的重要地表水系, 历史上是连通京津冀社会、经济和文化发展的纽带, 先后在漕运、防洪除涝、供水、景观、娱乐等功能方面发挥了巨大作用^[1]。流域范围涉及 10 个区, 40 个乡镇, 1 600 多个行政村, 流域面积占全市总面积的 25.9%, 人口却占全市总人口的 70% 以上, GDP 占全市的 80% 以上^[2], 是北京市人口集中、经济发达、城市化水平高的流域, 在北京市经济社会中占有举足轻重的地位。但同时北运河水系在北京 5 大水系中水质总体较差, 城市中心区除

昆玉河、长河水质为Ⅲ类, 新开渠为Ⅴ类外, 其余河湖均为Ⅳ类; 远郊区除十三陵水库水质为Ⅲ类外, 其余河流均为劣Ⅴ类^[3]。北运河流域生态环境压力巨大。

地下水因其水质良好, 分布广泛, 变化稳定及便于利用等原因, 成为人类理想的供水水源^[4]。地下水是北京市水资源的重要组成部分, 占全市总供水量的一半左右。然而自 20 世纪 90 年代中后期, 随着人口的急剧增长、经济的快速发展及城市化的快速进程, 地下水除遭受过量开采外还受到污染, 地下

水质监测成果显示北京市平原区地下水水质污染形势严峻,浅层地下水污染范围大,“资源型”和“水质型”缺水相互交织^[5]。北运河流域平原区是永定河、潮白河和温榆河3条河流冲洪积作用形成的平原,具备冲洪积扇完整的结构,更是受高强度人类活动影响的区域,探讨其地下水水质空间分布特征,可为该区域有针对性地采取地下水保护和污染防治措施、地下水资源合理开发利用、改善流域生态环境提供科学依据。然而以往关于北运河流域的研究多集中在地表水水系方面,鲜见对地下水水质的研究。本文以北京北运河流域平原区为研究区域,首先评价了地下水水质,然后利用 mapGIS 的空间分析功能绘制地下水水质分布图,最后对水质空间分布特征及成因、主要影响指标进行了分析。

1 研究区概况

北运河水系在北京境内干流总长约 90 km,自西北向东南贯穿北京,常年有水,河水主要来源于生活污水和降水。北运河主要支流清河、坝河、通惠河和凉水河是市区 4 大排水河道,雨水、生活污水、工业废水都经过这 4 条水系最终汇入北运河^[6]。北运河流域面积约 4 423 km²,其中,平原区(即研究区)面积约 3 370 km²,地势西北高、东南低。涉及的行政区域有中心城区、海淀、丰台、石景山、朝阳、大兴、通州、顺义和昌平(图 1)。

目前,研究区内开发利用的地下水主要是赋存于平原区第四系松散堆积物中的孔隙水。第四系松散堆积物主要由永定河、潮白河、温榆河等冲洪积扇组成,沉积厚度受古地形及河流作用控制,因此从山前到平原,无论从岩性、结构、富水性等方面都存在较明显的规律性。水平方向上,自山前向平原呈扇形展开,由冲洪积扇顶部单一的砂卵砾石层,向下逐渐过渡为 2~3 层结构的砂卵砾石层、多层砂砾石夹砂层和多层结构的砂及黏土层,富水性由大到小,由潜水逐渐过渡为承压水;垂直方向上,第四系含水层百米以内富水性最好,多为松散的砂卵砾石层,单层厚度较大且较集中,百米以下富水性一般较差,含水层为砂砾石及砂^[7]。

地下水总体流向与河流流向一致,即西北向东南。补给来源主要是大气降水,其次是山区侧向补给、地表河流、再生水河道、渠道等渗漏及农田灌溉水的回渗补给;天然条件下地下水排泄以蒸发和向河流排泄为主,目前人工开采已成为地下水的主要排泄方式^[8]。

依据地层沉积规律、时代特征、地下含水层结构、水质状况并考虑到北运河流域平原区地表污染源对地下水可能影响到的深度,在垂向上将研究区内 120 m 以浅的第四系松散孔隙水划分为 2 个含水层组(图 1)。

第一含水层组面积约 3 370 km²,主要为潜水及埋深小于 50 m 的具有微承压性质的承压水。冲洪积扇不同部位含水层组岩性不同,中上游含水层组岩性为砂卵石、砂砾石,下游为中粗砂、中细砂、粉砂、粉质砂土、砂质黏土;第二含水层组面积约 2 790 km²,为承压水。含水层组岩性为砂、砂砾石、黏土,底板埋深 80~120 m,局部地区以基岩作为底界。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

数据来源于北京市水文地质工程地质大队承担的“北京市平原区地下水环境监测网年(2015)运行”项目(以下简称项目)2015年6月份采样的水质监测井的水质测试结果,其中包括在研究区内的监测井 313 眼,第一含水层组 181 眼,第二含水层组 132 眼。

2.2 研究方法

首先选取“项目”地下水测试的指标中在《地下水质量标准》(GB/T14848-1993)里有分类限值规定的 17 项指标,采用国标推荐的地下水水质综合质量评价方法,评价地下水水质;然后在 mapGIS 中,利用其空间分析功能,采用克里格插值方法,绘制地下水水质分布图;最后根据分布图分析研究区地下水水质空间分布特征。

上述 17 项指标分别是:一般化学指标包括总硬度、溶解性总固体、氨氮、高锰酸盐指数、钠、氯化物、硫酸盐、锰和 pH 值 9 项;毒理学指标包括是铬(六价)、挥发性酚、氰化物、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、氟化物、砷和汞 8 项。选取上述 17 项指标作为参评指标。

地下水水质综合质量评价具体方法如下:首先进行各单指标评价,划分各指标所属类别(表 1),根据类别确定各单指标评价分值 F_i ,按公式(1)计算所有参评指标平均值;然后按公式(2)计算综合评价分值 F ,根据 F 值划分地下水水质级别(表 1)。

MAPGIS 中绘制地下水水质分布图方法如下:在 mapGIS 中,利用其空间分析功能,采用克里格插值方法,生成“GRD”文件;然后对“GRD”文件进行参数设置,其中“等值层值”按照表 1 中各级别所对应数值进行分段设置,生成地下水水质空间分布图;

最后根据实际情况对生成的图件进行校正、修改,最终完成研究区地下水水质分布图,作为分析水质空间分布特征的依据。

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

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

式中: F 为综合评价分值; \bar{F} 为所有参评指标 F_i 的平均值; F_{\max} 为单指标评价分值 F_i 中的最大值; n 为指标的项数;

表1 F_i 值分类及地下水水质分级

类别	F_i	水质级别	F
I	0	优良	<0.80
II	1	良好	0.80~2.50
III	3	较好	2.50~4.25
IV	6	较差	4.25~7.20
V	10	极差	>7.20

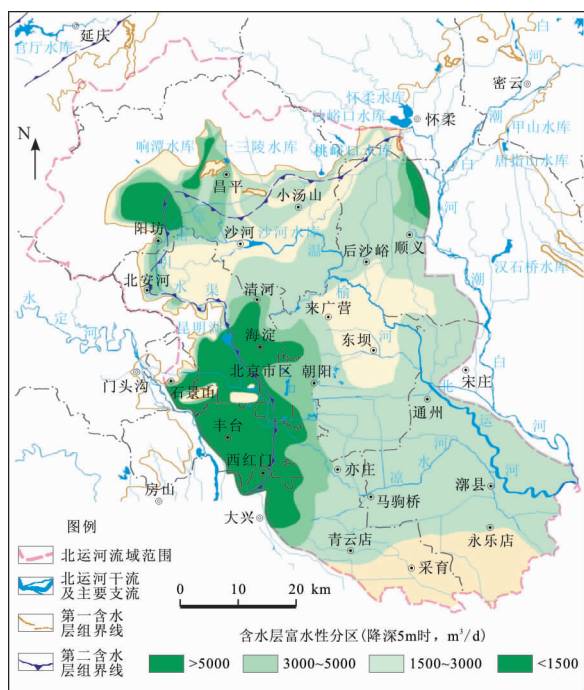


图1 研究区范围、含水层富水性分区及含水层组划分

3 结果与分析

3.1 研究区地下水水质空间分布特征

(1)第一含水层组。第一含水层组地下水水质优良和良好区分布在研究区最北端及中部局部地区,面积约 870 km^2 ,占第一含水层组面积的25.8%,大部分位于温榆河和潮白河冲洪积扇上游,

含水层主要为单一的砂卵石层,行政区划上包括昌平、海淀和怀柔部分地区;水质较差和极差区主要分布在研究区东南部,面积约 2500 km^2 ,占第一含水层组面积的74.2%。主要处于各冲洪积扇中、下游,含水层主要为多层砂砾石夹砂层和多层结构的砂层,行政区划上包括中心城区、海淀南部、丰台东部、石景山和大兴东南部、朝阳南北部、通州大部、顺义西南部和昌平南部。北运河干流及清河、坝河、通惠河和凉水河四条重要排污河流位于其中(图2)。

(2)第二含水层组。第二含水层组地下水水质优良和良好区从西北至东南大致呈两个顶角相对的三角形展布,面积约 1670 km^2 ,占第二含水层组面积的59.9%,从冲积扇上游至下游均有分布,含水层从单一结构的砂砾石层逐渐过渡为2-3层结构的砂砾石层、多层砂砾石夹砂层和多层结构的砂及粘土层,行政区划上包括海淀、朝阳、大兴、通州、昌平、顺义和怀柔部分地区;水质较差和极差区主要分布在研究区中西部和东南部,面积约 1120 km^2 ,占第二含水层组面积的40.1%,处于冲洪积扇中、下游,含水层主要为多层砂砾石夹砂层和多层结构的砂及粘土层,行政区划上包括中心城区、丰台东部、大兴东南局部、朝阳和通州西南部、顺义和昌平局部。北运河干流的温榆河北段、北运河段及排污河流通惠河东段和凉水河东段位于其中(图3)。

总体上,第一含水层组,研究区自西北向东南即从冲洪积扇上游至下游地下水水质逐渐变差,大致呈优良、良好、较差、极差的梯级变化特征;第二含水层组,研究区自西北向东南水质良好区面积变大。综合第一、二含水层组地下水水质空间分布特征,研究区西北部水质好于东南部。

3.2 水质空间分布特征成因分析

水质空间分布特征形成的原因既受自然条件制约又受人为因素影响,是二者耦合作用的结果。

从自然条件分析:(1)研究区西北部主要位于温榆河和潮白河冲洪积扇上游,含水层结构单一,地下水主要接受大气降水入渗补给,以溶滤作用为主,循环交替相对比较迅速,水质更新快。由西北向东南,即由冲洪积扇上游到中下游,含水层逐渐过渡为多层结构,含水介质颗粒变细、径流速度变慢,水质循环更新速率减缓,污染物易富集;(2)研究区东南部的通州,蒸发量大于降水量,浅层地下水蒸发浓缩作用明显,导致氟离子浓度升高;其南部第四系含水层为多层结构的砂层与砂质黏土层^[9],对氟离子有明显吸附作用;位于潮白河与永定河冲积扇中下游,

地势平缓,地下水径流速度慢,对氟离子富集有促进作用。气候条件、第四系岩性及地下水径流速度^[10],这些因素综合作用导致通州区南部第一含水层组地下水中氟富集。因此,氟超标主要是由自然条件形成的,属原生性。含氟的天然劣质水是造成通州区南部水质较差和极差的原因之一;研究区西北部的顺义和昌平分别位于潮白河和温榆河冲积扇中、下游,受地层沉积条件影响^[11],顺义西南部和昌平南部分布有含铁、锰的天然劣质水,是造成这些区域水质较差和极差的主要原因。(3)研究区地下水流向为西北向东南,各种污染物在水动力条件下按此方向运移,这也可能是造成西北部水质好于东南部的一种原因。因此,水文地质条件、天然劣质水和地下水流向是造成西北部水质好于东南部的重要自然条件。

从人为因素分析:(1)研究区西北部位于山前平原,其上游无人为污染源;(2)研究区东南部相对

于西北部工业更为集中。属水质较差和极差区的中心城区、海淀、朝阳、丰台和石景山医疗卫生、文化教育、垃圾处理场等生活附属设施数量相对更多;大兴和通州农业发达,工业多以石油化工、生物制药及重型机械制造为主导。生活污水、工业废水、化肥农药、垃圾渗滤液等这些人类活动的产物通过渗漏等途径进入地下,是地下水重要的污染源;(3)东南郊一代曾是北京地区的污灌区,灌溉回渗补给地下水。农业污水成为地下水又一污染源;(4)北运河主要支流清河、坝河、通惠河和凉水河4大排水河道在研究区从西北向东南次序排列,干流及这4大排水河道水质均为劣V类^[3],河水入渗补给地下水。被污染的河水也成为地下水污染源之一,因而河道两侧一定范围内地下水还受河流侧向渗漏的影响。污废水排放、污水灌溉、被污染的河水入渗等多种污染物输入补给以及强烈的人类活动与历史因素是造成东南部水质劣与西北部的重要原因。

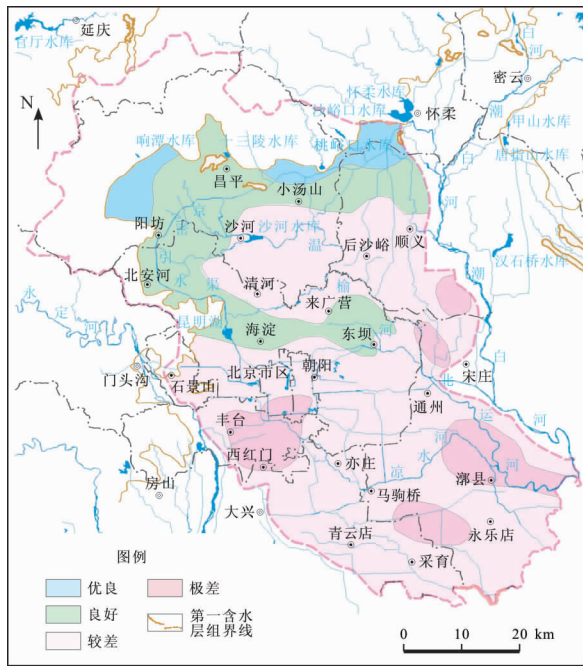


图2 第一含水层组地下水水质空间分布

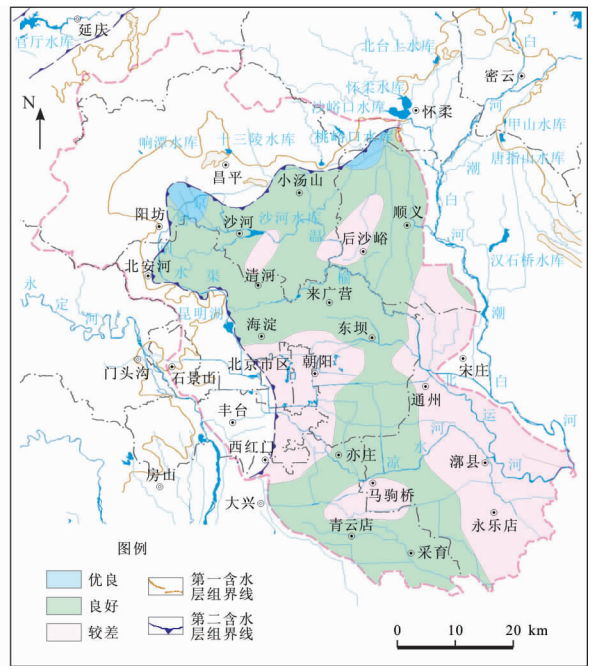


图3 第二含水层组地下水水质空间分布

3.3 水质较差和极差区主要影响指标

研究区内不同行政区、不同含水层组影响水质较差和极差的主要指标不尽相同。以《地下水质量标准》(GB/T14848-1993)为地下水各无机指标的评价标准,以其中Ⅲ类标准限值作为判定其是否超标的依据。

研究区第一含水层组有136眼井检出超标,检出超标指标13项,超标率75.1%。超标指标中,总硬度、溶解性总固体、氨氮、铁、锰、亚硝酸盐氮、硝酸

盐氮和氟化物8项超标率和浓度范围上限均较高(表2)。

研究区第二含水层组有85眼井检出超标,检出超标指标12项,超标率64.9%。超标指标中,总硬度、溶解性总固体、氨氮、铁、锰、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮7项超标率和浓度范围上限均较高(表2)。由前述可知,中心城区、海淀、朝阳、丰台、石景山和大兴主要受人类活动影响,污染物多元输入补给;通州受自然条件和人为因素双重影响;顺义和昌平主要

受自然条件影响。各种污染物由第一含水层组向下运移至第二含水层组,含水介质对污染物的降解、吸附、截留和阻滞,致使进入第二含水层组的污染物减少,浓度降低。因此,第一含水层组,水质较差和极差区的主要影响指标,中心城区、海淀、朝阳、丰台、石景山、大兴为总硬度、溶解性总固体和硝酸盐氮;

通州为总硬度、溶解性总固体、氨氮、亚硝酸盐氮、锰和氟化物;顺义和昌平为铁、锰。第二含水层组,水质较差和极差区的主要影响指标,中心城区、朝阳、丰台和大兴为总硬度和溶解性总固体;通州为总硬度、溶解性总固体、氨氮、亚硝酸盐氮和锰;顺义和昌平与第一含水层组相同,为铁和锰。

表2 2015年6月北运河流域平原区地下水各含水层组无机指标超标状况

指标	限值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	第一层(181眼)			第二层(132眼)			总计(313眼)	
		浓度范围/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	超标井 数量	超标 率/%	浓度范围/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	超标井 数量	超标 率/%	超标井 数量	超标率/ %
总硬度	450	453 ~ 1220	105	58.0	453 ~ 831	25	18.9	130	41.5
溶解性总固体	1000	1010 ~ 3890	77	42.5	1020 ~ 1830	14	10.6	91	29.1
一般化学 指标									
氨氮	0.2	0.26 ~ 7.07	24	13.3	0.27 ~ 2.31	15	11.4	39	12.5
高锰酸盐指数	3.0	3.39 ~ 4.65	7	3.9	3.27	1	0.8	8	2.6
氯化物	250	287 ~ 383	3	1.7	290	1	0.7	4	1.3
硫酸盐	250	268 ~ 1150	4	2.2	317 ~ 421	2	1.5	6	1.9
铁	0.3	0.32 ~ 26	57	31.5	0.32 ~ 5	54	40.9	111	61.3
锰	0.1	0.116 ~ 3.99	49	27.1	0.102 ~ 0.993	25	18.9	74	23.6
亚硝酸盐氮	0.02	0.067 ~ 4.98	22	12.2	0.081 ~ 2.98	19	14.4	41	13.1
理学 指标									
硝酸盐氮	20	88.9 ~ 234	32	17.7	92.3 ~ 144	8	6.1	40	12.8
氟化物	1.0	1.04 ~ 4.09	18	9.9	1.03 ~ 2.31	3	2.3	21	6.7
砷	0.05	0.068 ~ 0.421	5	2.8	0.052	1	0.8	6	1.9
汞	0.001	0.0011	1	0.5		0	0.0	1	0.3

4 结论与建议

(1)北京北运河流域平原区地下水水质呈现自西北向东南水质逐渐变差的特征。水质较差和极差区主要分布在研究区东南部,处于各冲洪积扇中、下游,行政区划上包括中心城区、海淀、丰台、石景山、朝阳、大兴、顺义和昌平部分及通州大部分地区。

(2)水质空间分布特征形成的原因既受自然条件制约又受人为因素影响。自然条件包括水文地质条件、天然劣质水及地下水流向;人为因素包括污水排放、污水灌溉、被污染的河水入渗。自然条件与人为因素耦合作用是导致北运河流域西北部水质好于东南部的原因。

(3)研究区内不同行政区、不同含水层组影响水质较差和极差的主要指标不尽相同。主要由人为因素造成水质较差和极差的行政区,主要影响指标第一含水层组是总硬度、溶解性总固体和硝酸盐氮;第二含水层组是总硬度和溶解性总固体。受自然条

件和人为因素双重影响造成水质较差和极差的通州区,主要影响指标第一含水层组是总硬度、溶解性总固体、氨氮、亚硝酸盐氮、锰和氟化物;第二含水层组是总硬度、溶解性总固体、氨氮、亚硝酸盐氮和锰。主要受自然条件制约造成水质较差和极差的行政区,主要影响指标第一、二含水层组都是铁和锰。

根据研究结果,对于北运河流域平原区内不同的水质类别分布区应采取不同的措施。对于水质较好的西北部地区,重点采取保护措施,加强污染源管理,提升污染源监测水平^[12-13],识别潜在污染源,防患于未然,防止水质由优良和良好向较差和极差类别转化;对于水质较差的东南部地区,应从源头进行防治。“去源”或“除源”是首要对策^[14],进一步降低人类活动对北运河流域地表的不良影响,从去除流域内点源、加大农业面源治理力度、健全农村生活排污管网、改善河流水质等措施方面减少污染源数量,改善整个流域的生态环境,降低地下水中主要由

(下转第71页)

4 结 论

(1)黄淮海地区洪旱灾害存在显著的年际和年代际变化特征,总体上17世纪和20世纪旱灾偏多,18世纪和19世纪洪灾偏多,21世纪前十年趋向干旱发展。

(2)黄淮海地区各子区域间的年际变化存在一定的差异,干湿阶段也不尽相同,洪旱突变时段差别较大;20世纪以来,海河南系和淮河中部地区洪旱灾害尤为严重。

(3)洪旱灾害在19世纪后半叶至20世纪上半叶存在3a左右短周期,近年来洪旱灾害也较为频繁,且洪旱灾害发生周期的空间分布差异性显著。

参考文献:

- [1] 吴永祥,姚惠明,王高旭,等. 淮河流域极端旱涝特征分析[J]. 水利水运工程学报,2011(4): 149-153.
- [2] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展,2013,24(3): 303-310.
- [3] 杨涛,陆桂华,李会会,等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展,2011,22(2): 279-286.
- [4] 尹军,杨志勇,袁喆,等. 1961-2011年黄淮海地区极端降水时空变化特征[J]. 灾害学,2015,30(3): 71-75.

- [5] 黄茹,杨贵羽. 黄淮海流域干旱时间组合特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2): 1-6.
- [6] 徐建文,居辉,刘勤,等. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2014,34(2): 460-470.
- [7] 徐玉霞. 近100年关中地区干旱灾害的时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5): 231-235.
- [8] 杨传国,陈喜,张润润,等. 淮河流域近500年洪旱事件演变特征分析[J]. 水科学进展,2014,25(4): 503-510.
- [9] 曹永强,刘佳佳,王学风,等. 黄淮海流域旱涝周期、突变点和趋势分析研究[J]. 干旱区地理,2016,39(2): 275-284.
- [10] 中国气象局气象科学研究所,中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京:地图出版社,1981.
- [11] 中国气象局国家气象信息中心资料服务室,中国地面降水月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集V2.0[R]. 北京:中国气象局国家气象信息中心资料服务室,2012.
- [12] 黄振平,陈元芳. 水文统计学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [13] 黄强,孔波,樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. 人民黄河,2016,38(10): 18-23.
- [14] 卢燕宇,吴必文,田红,等. 基于Kriging插值的1961-2005年淮河流域降水时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(5): 567-573.
- [15] 时芳欣,郝振纯,杨传国,等. 黄淮海地区降水概率分布类型分析[J]. 水电能源科学,2014,32(9): 1-5.

(上接第65页)

人为因素造成的总硬度、溶解性总固体、氨氮和亚硝酸盐氮等指标的浓度,使地下水水质得到改善,特别对于通州南部氟化物超标的水井,建议严格水井设计和成井工艺,避免层层取水。第一、二含水层组地下水水质差异较大,应当分层开采^[15]。

参考文献:

- [1] 姜娜,冯绍元,郑艳侠,等. 北京市北运河流域地表水环境问题分析与治理对策[J]. 中国农村水利水电,2010(6): 9-11.
- [2] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队. 北京区域统计年鉴[M]. 北京:同心出版社,2011:27-35.
- [3] 北京市环境保护局. 2015年北京市环境状况公报[R]. 北京:北京市环境保护局,2016,4.
- [4] 唐克旺,侯杰,唐蕴. 中国地下水质量评价(1)——平原区地下水水化学特征[J]. 水资源保护,2006,22(2): 1-5.
- [5] 林健,杨庆,赵微,等. 北京市平原区地下水环境监测网运行2015年度成果报告[R]. 2016:1.
- [6] 荆红卫,张志刚,郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污

- 染来源分析[J]. 中国环境科学,2013,33(2): 319-327.
- [7] 陈忠荣,林健,赵微,等. 北京地下水污染调查评价成果报告[R]. 2010.
- [8] 王丽亚,郭海朋. 连续干旱对北京平原区地下水的影响[J]. 水文地质工程地质,2015,42(1): 1-6.
- [9] 张安京,叶超,李宇,等. 北京地下水[M]. 北京:中国大地出版社,2008.9.
- [10] 刘永清. 北京市通州区第四系地下水氟分布规律研究[J]. 北京水务,2008(3): 28-31.
- [11] 赵微,林健,郭高轩,等. 北京市地下水环境分层监测和专项监控网的建立[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(2): 83-87.
- [12] 龚怒,顾乡. 污染源自动监控相关问题探讨[J]. 环境监测管理和技术,2011,23(2): 11-14.
- [13] 喻义勇,董艳平,孟磊. 污染源在线监控管理模式探讨[J]. 环境监测管理和技术,2008,20(5): 5-8.
- [14] 郭高轩,李宇,许亮,等. 北京平原区第四系地下水污染风险评价[J]. 环境科学,2014,35(2): 562-568.
- [15] 北京市人大常委会. 北京市水污染防治条例[R],北京:2010,11.