

河北省地下水饮用水源地水质变化分析

颜金玲^{1,2}, 龚家国², 任政¹, 王英², 潘世兵²

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 为了科学分析近年来河北省地下水饮用水源地的水质状况,以河北省42个地下水饮用水源地2000、2018年的24项指标作为评价对象,结合单一指标评价法与综合评价法分析水质状况,并进行原因分析。结果表明:相较于2000年,2018年19项水质指标污染程度均减轻,氟化物污染程度较重,新增4项超标水质指标;安全水源地比例增加了11.9%,且极差水源地消失,但优良水源地也消失;水源地保护区内耕地面积减小,林地面积增大,建设用地面积增大,农业污染面积减小,工业和生活污染面积增大;污染物主要来源于农业化肥、工业废水和生活垃圾污染3个方面,且地下水超采也会对水质造成影响。研究结果可以对河北省地下水饮用水源地管理和保护提供科学依据和实践支撑。

关键词: 地下水饮用水源地;水质分析;单一指标评价;综合评价;河北省

中图分类号:X523

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)06-0078-09

Analysis of groundwater quality change of drinking water sources in Hebei Province

YAN Jinling^{1,2}, GONG Jianguo², REN Zheng¹, WANG Ying², PAN Shibing²

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to analyze the water quality of groundwater drinking water sources in Hebei Province in recent years, taking 24 indexes of 42 groundwater drinking water sources in Hebei Province in 2000 and 2018 as the evaluation objects, the water quality situation and the contributing factors were analyzed using single index evaluation method and comprehensive evaluation method. The results showed that compared with 2000, the pollution level of 19 water quality indicators was reduced in 2018, fluoride pollution degree was serious, and four new water quality indicators exceeding the standard were added, The safe water sources creased by 11.9%, but the good water sources disappeared along with the extremely poor ones. In the protection area, the cultivated land area decreased and the forest land area increased, the construction land area increased, the agricultural pollution area decreased, and the industrial and domestic pollution areas increased. The pollutants mainly come from agricultural fertilizer, industrial wastewater and domestic waste, and groundwater overdraft will also affect the water quality. The research results can provide scientific guidance and practical support for the management and protection of groundwater drinking water sources in Hebei Province.

Key words: groundwater drinking water source; water quality analysis; single index evaluation; comprehensive evaluation; Hebei Province

1 研究背景

地下水是华北地区生活和工农业生产的重要供

水水源,相比地表水而言,地下水水量稳定,水质好。但近些年由于地下水超采、环境污染以及工业化和农业现代化建设的影响^[1-2],地下水水质状况不容

收稿日期:2020-11-22; 修回日期:2021-01-20

基金项目:科技基础资源调查专项(2017FY100407)

作者简介:颜金玲(1995-),女,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

通讯作者:龚家国(1977-),男,湖北襄阳人,博士,教授级高级工程师,研究方向为水文及水资源。

乐观^[3]。文冬光等^[4]在研究中国东部主要平原地区地下水质量与污染评价中发现,华北平原地区直接可以饮用的地下水(I~Ⅲ类水)仅占23.4%,经过适当处理后可以饮用的地下水(Ⅳ类水)占21.8%,须经过专门处理后才能饮用的地下水(Ⅴ类水)占54.8%;浅层地下水中I~Ⅲ类水仅占22.2%,深层地下水中I~Ⅲ类水仅占26.45%。在2013年国家北方地下水污染调查结果中,华北平原地区浅层地下水可以直接饮用的占比较低^[5],据《2018年中国生态环境状况公报》显示,全国10168个地下水监测点中水质为Ⅳ、Ⅴ类的占86.2%,主要超标指标为锰、铁、浑浊度、总硬度、溶解性总固体、碘化物、氯化物、三氮以及硫酸盐等指标。唐克旺等^[6]对全国城市地下水饮用水源地水质状况评价研究表明,2004年全国水质不安全水源地占49.47%,河北省水质不安全水源地占49.73%。席北斗等^[7]研究发现,京津冀地区2013年有72%的浅层地下水受到污染,其中有机物污染较为严重,污染比例占到29.17%。李圣品等^[8]在对2013-2017年全国地下水水质分布及变化特征的研究中指出,针对20项常规监测指标,河北省2013-2016年存在9项超标指标,2017年存在10项超标指标,且每年均超过8项指标超标10%以上,在这些年份中2017年超标项最多,其中总硬度、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐以及铁、锰在2017年的超标率均升高,是全国地下水水质较差的城市之一。

水质安全是饮水安全的重要前提,地下水饮用水源地作为城镇生活直接供水水源,其水质变化关系到人民身体健康和生命安全^[9-10]。水质评价是水污染治理工作中的基础内容,定期检测、评价水质,分析水质超标原因是制定合理的水污染防治策略的重要科学基础^[11-12],也是对地下水饮用水源地管理、制定水源地水质净化策略的主要参考依据。国内外研究者通过分析水源地所在位置的地质特点、所在含水层岩系以及人类活动等方面分析地下水饮用水源地水质超标的原因^[13],如董少杰等^[14]通过分析地质原因以及人类活动因素发现青岛市18处地下水饮用水源地水质超标主要是农业、工业及农村非点源污染所致;刘启龙等^[15]对黑龙江省绥化市第一水源地水质研究发现,水源地水质污染主要受地质环境和各种污染源的影响;崔健等^[16]通过研究齐齐哈尔市的土地利用类型变化分析水质变化的原因,发现城镇化建设与工矿用地土地资源的长期开发是直接影响该地区地下水水质的主要土地利

用方式;危润初等^[17]通过研究土地利用类型与地下水污染空间分布之间的关系发现,传统工业用地、居民和商业用地、城市交通设施与地下水之间存在较好的相关性。

河北省地处北方缺水地区,为加强地下水污染防治,提升地下水饮用水源地安全,近年来国家和地方采取一系列措施。为理清河北省地下水饮用水源地水质变化情况,本研究基于2000和2018年地下水饮用水源地水质调查数据和土地利用数据,从单一指标与综合评价两方面分析水源地水质变化,并通过水源地保护区范围内的土地利用类型变化分析水质变化的原因,为水源地水质改善和污染防治提供科学支撑。

2 研究区域概况

河北省地处华北平原,介于36°05'N~42°40'N,113°27'E~119°50'E之间,总面积1888 km²,东临渤海、内环京津,西为太行山,北为燕山,燕山以北为张北高原,是中国唯一兼有高原、山地、丘陵、平原、湖泊和海滨的省份,地形以河北平原为主,地跨海河、滦河两大水系。地下水是河北省主要供水水源,2018年地下水资源量为124.41×10⁸ m³,地下水供水量达到总供水量的58.2%。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源与处理

本研究水质数据主要有两个来源,其中2000年水质监测数据为《全国城市饮用水水源地安全保障规划》项目数据成果,2018年水质监测数据为科技基础资源调查专项项目《京津冀地区地下水饮用水源地基础资源环境状况调查》的数据成果;土地利用数据来源于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/DataProduct/Index/200804>)。

河北省共有地下水饮用水源地200多处,2000年以来,由于经济社会发展、外流域调水和自然条件变化等原因,水源地数量和位置变化较大。为了准确地对比水质的变化,选取42个位置没有变化的地下水饮用水源地进行分析研究,其分布位置见图1。

选取的42个水源地中按照地下水埋藏类型分为承压水和潜水;按照含水层介质类型分类有孔隙水、岩溶水和裂隙水。水源地具体情况见表1,表1中编号对应图1中水源地位置。

选取24项地下水水质指标开展评价分析,具体指标见表2。

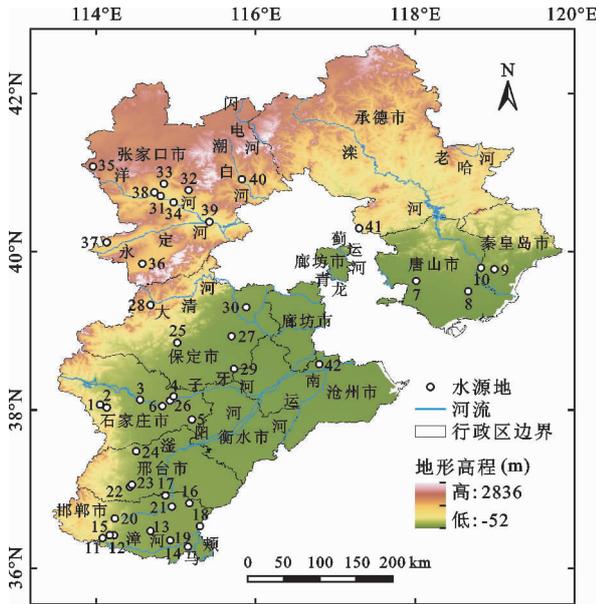


图1 所选取的河北省地下水饮用水源地位置及其编号

表1 所选取的地下水饮用水源地概况

城市	编号	埋藏类型 (数量)	介质类型 (数量)
石家庄	1~6	承压水(6)	孔隙水(6)
唐山	7~8	承压水(2)	孔隙水(2)
秦皇岛	9~10	潜水(2)	孔隙水(2)
邯郸	11~21	承压水(11)	孔隙水(7)、 岩溶水(4)
邢台	22~24	承压水(3)	裂隙水(2)、 岩溶水(1)
保定	25~30	承压水(6)	孔隙水(6)
张家口	31~40	承压水(2)、 潜水(8)	孔隙水(10)
承德	41	潜水(1)	裂隙水(1)
沧州	42	承压水(1)	孔隙水(1)

表2 地下水水质指标分类表

指标类别(数量)	具体指标
感官性指标(3)	嗅和味、肉眼可见物、浑浊度
一般化学指标(9)	pH、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、耗氧量、氨氮
毒理学指标(8)	硝酸盐、氟化物、碘化物、氰化物、汞、铬、镉、铅
放射性指标(2)	总 α 放射性、总 β 放射性
微生物指标(2)	总大肠菌群、细菌总数

利用地下水饮用水源地保护区范围内的土地利用类型变化进行水质变化原因解析,土地利用数据为30 m×30 m分辨率的栅格数据。

3.2 研究方法

同一水源地采用不同的评价方法得到的水质评价结果不尽相同^[18],综合采用单一指标和综合评价两种方法进行水质安全评价。其中依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[19]进行单一指标评价,评价结果中I、II、III类为不超标水质,IV、V类为超标水质,并通过超标率及超标倍数表现水质的超标程度。在此基础上,选取标准中推荐的 F 值法^[20]进行综合评价, F 值法与模糊综合评价法、内梅罗指数法等综合评价方法相比,其结果值较高,会高估水质污染程度,但该方法能够突出最大污染因子的影响^[21],更能体现出水源地存在的水质问题^[22],具体等级见表3。表3中优良、良好和较好等级为安全水源地,可直接饮用;较差和极差等级为不安全水源地,较差水源地水经过适当处理后可以饮用,而极差水源地水经过专门处理后可饮用。

表3 地下水质量综合评价等级表

等级	优良	良好	较好	较差	极差
F 值范围	<0.80	0.80~2.50	2.50~4.25	4.25~7.20	>7.20

水源地保护区是对水源地水质影响最大的区域,分析保护区内的土地利用类型对水质的影响更加准确。根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)^[23]中的保护区划分方法,中小型孔隙水的地下水饮用水源地采用经验值法确定一级和二级保护区半径,见表4。

表4 采用经验值法确定的保护区半径

介质类型	一级保护区 半径 R_1 /m	二级保护区 半径 R_2 /m
细砂	30	300
中砂	50	500
粗砂	100	1000
砾石	200	2000
卵石	500	5000

其他类型水源地保护区半径采用保护区经验公式法即公式(1)确定:

$$R = \alpha \cdot K \cdot I \cdot T/n \quad (1)$$

式中: R 为保护区半径,m; α 为安全系数,取150; K 为含水层渗透系数,m/d,根据经验取值范围为0.5~25 m/d; I 为水力坡度(为漏斗范围内的水力平均坡度),根据等水位线取值范围为0.8~1.8; T 为污染物水平迁移时间,d,一级保护区取值为100 d,二级保护区取1000 d; n 为有效孔隙度,采用水井所在区域代表性的 n 值,取值范围为0.02~0.26。确定保护区范围后,以图2所示的方法进行保护区划分。

4 结果与分析

4.1 水源地水质状况

图3为2000年研究区地下水水源地水质单一指标评价结果,由图3可知,2000年研究区地下水水源地共有15个超标水质指标,主要超标水质指标

为一般化学指标(6个)和毒理学指标(5个);超标率最大的4个指标为总硬度、总大肠杆菌菌群、氯化物和硝酸盐指标,其中总硬度的超标率14.29%,最大超标倍数为1.16倍;总大肠杆菌菌群的超标率为11.90%,最大超标倍数为5.00倍;氯化物的超标率为9.52%,最大超标倍数为0.73倍;硝酸盐的超标率为9.52%,最大超标倍数为4.05倍。

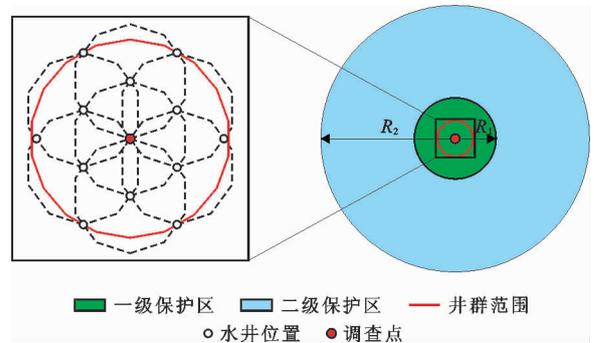
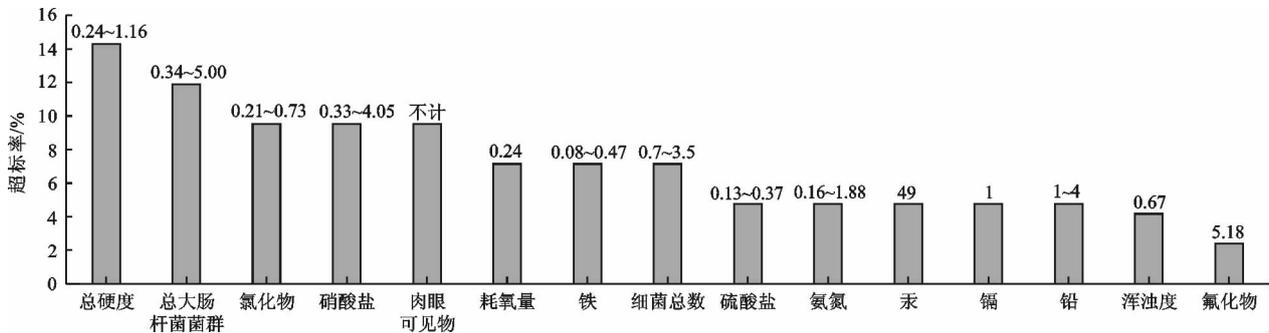


图2 保护区范围划分方法示意图



注:图中每一柱体顶部数据为相应水质指标的超标倍数,不计算超标倍数的指标标为“不计”,下同。

图3 2000年研究区地下水水源地水质单一指标评价结果

图4为2000年研究区地下水水源地水质综合评价结果,表5为2000年研究区地下水水源地分区域水质评价结果。由图4和表5可知,在选取的河北省水源地中,安全水源地占45.24%,区域水质安全关系为邢台市>承德市>沧州市>石家庄市>秦皇岛市>保定市>唐山市>张家口市>邯郸市;邢台市和承德市水源地全部安全,其中邢台市优良水源地占33.33%,良好水源地占66.67%,且不存在超标水质指标;唐山市、邯郸市和张家口市不安全水源地均在50%以上且超标水质指标较多,其中唐山市不安全水源地达到100%,超标水质指标有2个;邯郸市不安全水源地占54.54%,极差水源地占9.09%,超标水质指标有7个;张家口市不安全水源地占70%,其中极差水源地占20%,超标水质指标有7个。综合以上结果,邢台市水质最好,张家口市和邯郸市水质最差。

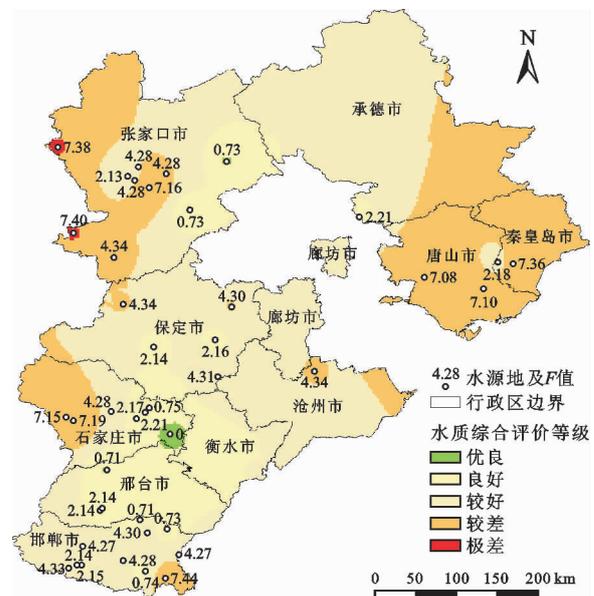


图4 2000年研究区地下水水源地水质综合评价结果

市、张家口市和承德市存在水质超标的水源地主要类型为潜水,潜水易受地表污染,污染物主要来源于地表的农业化肥、工业废水及生活污水 3 个方面。

表 7 为 2000 年与 2018 年研究区地下水水源地一、二级保护区各土地利用类型面积占比,表 8、9 分别为 2000-2018 年研究区地下水水源地一、二级保护区各土地利用类型面积转移情况。

由表 7 可以看出,水源地一级、二级保护区内均存在耕地等农业活动区域和建设用地等居民生产

活区域,对水源地造成农业化肥、工业废水和生活污水污染;但 2018 年与 2000 年相比,耕地面积减少,从而减小了农业化肥对水源地的污染程度;林地面积增大,林地可以防止水土流失、固沙固水、净化和改善水质,结合他人研究认为植被对河北省城市水源地、冀北、太行山和燕山山地水源地具有涵养功能^[24];建设用地面积增大,未利用地和水域面积减小,人类活动范围增大,结合他人研究认为耕地和建设用地对水质净化具有副作用^[25]。

表 6 2018 年研究区地下水水源地分区域水质评价结果

城市(区域)	综合评价水质等级占比/%					单指标各评价结果数目	
	优良	良好	较好	较差	极差	不安全水源地	不安全水质
石家庄	0	83.33	0	16.67	0	1	1
唐山	0	50.00	0	50.00	0	1	1
秦皇岛	0	0	0	100.00	0	2	3
邯郸	0	45.45	0	54.55	0	5	4
邢台	0	100.00	0	0	0	0	0
保定	0	66.67	0	33.33	0	2	2
张家口	0	60.00	0	40.00	0	4	3
承德	0	0	0	100.00	0	1	1
沧州	0	0	0	100.00	0	1	2
全省	0	57.14	0	42.86	0	17	9

表 7 2000 年与 2018 年研究区地下水水源地保护区各土地利用类型面积占比

%

土地类型	一级保护区		二级保护区		合计	
	2000 年	2018 年	2000 年	2018 年	2000 年	2018 年
耕地	52.47	40.65	62.23	51.60	61.68	50.99
林地	3.44	3.65	4.22	4.95	4.18	4.87
草地	15.57	15.31	13.30	12.20	13.43	12.37
水域	2.05	1.81	2.16	1.94	2.15	1.93
建设用地	25.89	38.38	17.34	28.92	17.82	29.45
未利用地	0.58	0.20	0.75	0.39	0.74	0.39

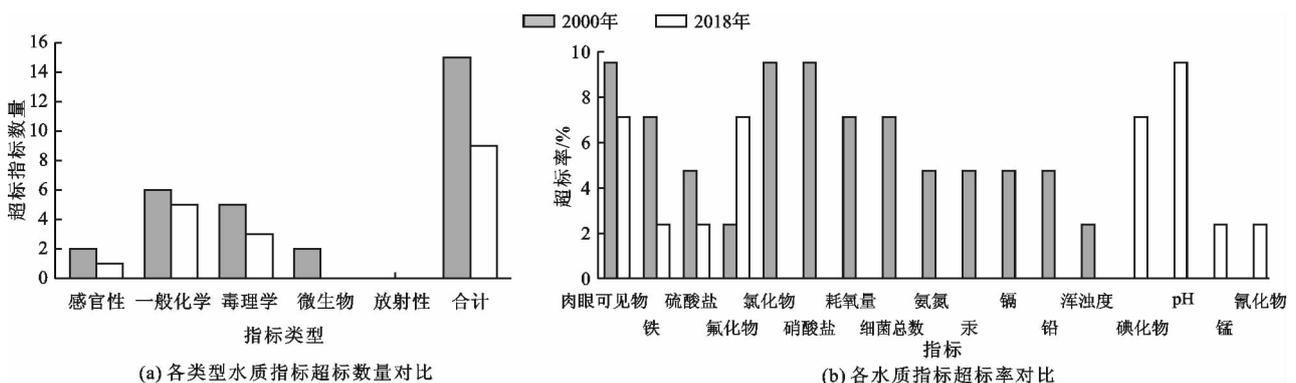


图 7 2000 年与 2018 年研究区地下水水源地单一指标水质评价结果对比

表8 2000-2018年研究区地下水水源地一级保护区各土地利用类型面积转移矩阵

km²

土地类型	水田	旱地	林地	草地	水域	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	沼泽地	2018年
水田	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
旱地	7.70	30.22	0.36	0.38	0.05	0.13	0.95	0	0.19	39.98
林地	0	0.56	2.50	0.33	0	0.16	0.04	0	0	3.59
草地	0	0.55	0.03	13.69	0.15	0.60	0.02	0	0	15.04
水域	0.04	0.33	0.02	0.01	1.26	0.01	0	0	0.12	1.79
城镇用地	0.96	5.63	0.38	0.08	0.16	14.88	0.12	0.10	0.03	22.34
农村居民点	1.80	2.55	0.01	0.47	0.31	4.12	4.28	0	0.10	13.64
其他建设用地	0.75	0.47	0.08	0.32	0.09	0.03	0	0	0	1.74
沼泽地	0.01	0	0	0.03	0	0	0	0	0.15	0.19
2000年	11.26	40.31	3.38	15.31	2.02	19.93	5.41	0.10	0.59	98.31

表9 2000-2018年研究区地下水水源地二级保护区各土地利用类型面积转移矩阵

km²

土地类型	水田	旱地	林地	草地	水域	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	沼泽地	裸岩石质地	2018年
水田	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
旱地	82.60	754.40	4.33	15.70	5.14	3.09	24.57	2.35	7.03	0.06	899.27
林地	0.18	13.81	62.70	7.79	0.62	0.32	0.23	0.29	0	0	85.94
草地	0.01	10.67	1.79	201.00	2.03	0.72	0.77	0.79	0	0.30	218.08
水域	0.49	6.61	0.72	0.49	24.70	0.09	0.29	0.08	0.65	0	34.12
城镇用地	5.68	91.19	0.90	3.96	1.54	132.20	16.23	2.68	0.04	0.88	255.30
农村居民点	10.50	80.73	0.79	3.01	2.01	7.66	110.00	1.94	0.33	0.13	217.10
其他建设用地	4.63	25.02	2.40	3.52	1.94	0.17	1.76	6.50	0.91	0	46.85
沼泽地	0.53	0.40	0	0.09	0	0	0.03	0	2.47	0	3.52
裸岩石质地	0	0.36	0	1.13	0	0	0	1.41	0	0.26	3.16
2000年	104.62	983.19	73.63	236.69	37.98	144.25	153.88	16.04	11.43	1.63	1763.34

由表8、9可以看出,水源地保护区内水田消失,水域、沼泽地面积减小,主要转化成了旱地和农村居民点。一方面是由于人类生产活动改变土地利用类型造成的,另一个重要的原因是地下水超采,造成地下水水位下降,地表水体垂向渗漏通量增大,使地表水体消失。相关资料表明,与2000年相比,2018年河北省浅层地下水水位降低了5.45 m,深层地下水水位降低了30 m。当前,河北省内存在7个较大地下水漏斗区,是全国最大的地下水漏斗区,水源地超采严重,加快了地下水循环过程,破坏了水源地水化学平衡,是水源地水质仍然较差的主要原因^[19]。

综合来看:(1)2000年研究区地下水水源地水质指标中的总硬度、氯化物、硝酸盐和氨氮超标,且总硬度超标水源地中超过50%的氨氮和硝酸盐也超标,其主要来源于农业化肥污染;农业化肥中的氮

氮通过与水中阳离子反应增加了水质的硬度;一级保护区内存在了耕地,且面积超过总面积的50%,直接对水源地造成农业污染,但在2018年一、二级保护区内耕地面积减小,且随着社会的发展,农业化肥使用更加环保合理,总硬度和氯化物超标现象得到改善。我国在2018年制定了《复合肥料》国家标准计划,相比较2009年版的更加严格、详细,以促使农业化肥污染减少。(2)2018年研究区地下水水源地水质指标中的pH、肉眼可见物、氟化物、碘化物超标主要来源于工业废水污染,一级保护区内存在其他建设用地,且相较于2000年,2018年增加了1650%,二级保护区内也增加192%,水源地附近的工业污染加重,导致水源地pH、肉眼可见物、氟化物以及碘化物出现超标现象。而pH超标除人类活动影响外,与自然环境也存在一定的关系,研究发现

pH 过高是山前补给区钠长石等矿石的溶解形成的 HCO_3^- —Ca、Mg 水逐步演化而导致的。(3) 相比 2000 年,2018 年得到改善的水质指标总大肠杆菌菌群、细菌总数、氨氮、硝酸盐主要源于早期人类生活污水和养殖废弃物。近年来,河北省对全省农村的“连茅圈”进行改造,至 2018 年其改造率已达到 75% 以上。此外,通过实施美丽乡村建设、农村人居环境整治行动、地下水超采综合治理等一系列措施,使地下水污染防治更加全面、有效,从而减少了来自生活污水和养殖废弃物等的污染物,使河北省的地下水水质一步步得到改善。

5 结论与讨论

本文利用单一指标评价法和综合评价法,分析了河北省 42 个地下水饮用水源地 2000 年与 2018 年水质状况,并结合水源地保护区土地利用类型变化情况,进行了水源地地下水水质变化原因分析研究。主要研究结论如下:

(1) 通过单一指标法分析,2018 年主要超标污染物为一般化学指标(5 个)和毒理学指标(3 个),其中超标最严重的指标为 pH、氟化物、碘化物、肉眼可见物,而 2000 年主要超标指标为总硬度、总大肠杆菌菌群、氯化物和硝酸盐。与 2000 年相比,2018 年超标指标数量减少,多数指标的超标程度减小,但新增了 4 项新的指标超标且氟化物污染程度加重。

(2) 综合评价结果表明,2000 年全省优良水源地占比 19.05%,地下水水源地水质最好的地区为邢台市、承德市和沧州市;而 2018 年,邢台市仍然为水质最好的水源地,但秦皇岛市、承德市和沧州市水源地安全度相对较差。相较于 2000 年,2018 年安全水源地比例增加了 11.9%,极差水源地消失,较差水源地减少,较好和良好水源地增多,且 57.1% 的水源地水质得到改善。

(3) 结合保护区土地利用类型变化与转移情况分析表明,与 2000 年相比,2018 年耕地面积减小、林地面积增大、建设用地面积增大,由此可认为农业污染面积减小、人类活动范围增大、工业和生活污染源面积增大;保护区内的水域、水田、沼泽地大部分转换成了旱地和农村居民点,地下水超采严重,地下水的水化学平衡被破坏,导致 2018 年水质仍然较差;未利用地减小,建设用地增大,耕地和林地转换成建设用地,水源地附近工厂、交通用地增多,污染源增大。水源地水质超标主要来源于农业化肥、工业废水以及生活垃圾污染 3 个方面,且水源地超采

也会对水质造成影响。

通过上述研究,对于地下水饮用水源地水质保护,需要尽量减少保护区内耕地和建设用地,增加水源地涵养林面积,防止对水源地造成较严重的面源污染。地下水水质除了受人类活动影响之外,还受天然水化学特征的影响,如氟化物受天然地质影响较大,但在地下水开采后通过物理法、化学法、物理化学法以及生物化学法等进行严格处理后即可达到人类生活用水标准;pH 值较大的水源可将水静置一段时间后再饮用;肉眼可见物等固体污染物可进行过滤处理。本文采用 F 值法会突出最大污染因子的影响,可以凸显水源地存在的水质问题,但综合评价结果值偏高。由于地下水污染物来源多样且迁移转化规律复杂,本文仅基于典型数据结合土地利用变化对河北省地下水饮用水源地水质变化情况和原因进行了分析,还需要对分析评价方法进行改善,并结合对污染源的调查和地下水运移模型等开展进一步的研究。

致谢: 本文得到科技基础资源调查专项(2017FY100400)项目相关单位河北省地矿局水文工程地质勘测院及河北省水利水电第二勘测设计研究院提供的数据支撑,同时,河北省水利水电第二勘测设计研究院的田元老师在所研究分析的水源地确定方法等方面进行了指导,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 韩智勇,许模,刘国,等. 生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价[J]. 中国环境科学,2015,35(9): 2843-2852.
- [2] 石建省,李国敏,梁杏,等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报,2014,35(5):527-534.
- [3] 吴爱民,荆继红,宋博. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J]. 地质学报,2016,90(10):2939-2947.
- [4] 文冬光,林良俊,孙继朝,等. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2012,37(2):220-228.
- [5] 段雯娟. 京津冀. 水污染的另一大重灾区[J]. 地球,2016(2):24-26.
- [6] 唐克旺,朱党生,唐蕴,等. 中国城市地下水饮用水源地水质状况评价[J]. 水资源保护,2009,25(1):1-4.
- [7] 席北斗,李娟,汪洋,等. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策[J]. 环境科学研究,2019,32(1):1-9.
- [8] 李圣品,李文鹏,殷秀兰,等. 全国地下水水质分布及变化特征[J]. 水文地质工程地质,2019,46(6):1-8.
- [9] 杨艺,王瑞卿,宋晓维. 农村地下水污染现状、危害及防

- 治对策[J]. 环境保护, 2014, 42(15): 34-36.
- [10] 邓安琪, 董兆敏, 高群, 等. 中国地下水砷健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3556-3565.
- [11] 汪璇. 我国地下水污染防治的法律规制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [12] 董杰, 李欣, 方运海, 等. 基于改进模糊综合-指数平滑法的地下水水质评价和预测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 126-135.
- [13] 庞会从, 刘福亮, 付海燕, 等. 2009-2014年河北平原浅层地下水硝态氮特征及其来源[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4766-4772.
- [14] 董少杰, 孟春霞, 王成见. 青岛市地下水源地水质评价及污染原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(6): 54-57.
- [15] 刘启龙, 车丽娜. 绥化市水源地地下水污染特征分析及水质评价[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10): 3528-3534.
- [16] 崔健, 都基众, 李霄, 等. 齐齐哈尔市土地利用变化及其对地下水水质的影响[J]. 地球与环境, 2015, 43(3): 308-315.
- [17] 危润初, 肖长来, 梁秀娟. 吉林市城区地下水污染时空演化[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 417-423.
- [18] 艾亚迪, 魏传江, 李丽琴, 等. 地下水水质评价方法对比——以偃师市为例[J]. 节水灌溉, 2018(11): 77-80.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [20] 刘伟, 张梦琳, 杨双喜, 等. 不同地下水水质评价方法的对比研究——以宜良县为例[J]. 环境工程, 2017, 35(3): 147-151.
- [21] 张晓叶, 张永祥, 任仲宇, 等. 不同地下水水质评价方法的比较及实例应用[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 98-101.
- [22] 常明庆, 王平, 李娟, 等. 地下水环境质量评价常用方法对比分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(4): 74-76.
- [23] 国家环境保护总局. 饮用水水源保护区划分技术规范: HJ 338-2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [24] 刘征, 赵旭阳. 河北省水源涵养生态功能保护区划分研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 180-183.
- [25] 杨强强, 徐光来, 杨先成, 等. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9048-9058.
- [26] 石建省, 李国敏, 梁杏, 等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 527-534.

(上接第77页)

- [22] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982-2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [23] GU Yingxin, WYLIE B K, HOWARD D M, et al. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA [J]. Ecological Indicators, 2013, 30: 1-6.
- [24] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于MODIS-EVI的重庆植被覆盖时空分异特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6992-7002.
- [25] 史尚渝, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原地区植被指数对干旱变化的响应[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 1-13.
- [26] 万红莲, 王静. 多尺度下宝鸡地区干旱动态格局演变及其与植被覆盖的关系[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6941-6952.
- [27] 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7908-7918.
- [28] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 等. 华北地区2001-2014年植被变化对SPEI气象干旱指数多尺度的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1028-1039.
- [29] 萨茹拉, 丁勇, 侯向阳. 北方草原区气候变化影响与适应[J]. 中国草地学报, 2018, 40(2): 109-115.