

凉水河流域地下水水化学特征和时空变化规律

李捷*,姜颖,刘玉莲,姜亚,滕彦国 (北京师范大学,水科学研究院 100875)

摘要: 北京凉水河流域的同位素和水化学特征分析表明:1)地下水水质在 100m 以浅相对较差,但到 2017 年为止,水质保持稳定.2)浅层地下水与平原区河水同位素相对富集,且落在同一条蒸发线上;但整体上河水与浅层地下水水化学类型不同,据此推断山前冲洪积扇河水入渗是区域地下水补给的重要来源,下游地下水主要受到侧向径流影响.3)同位素平衡和质量平衡计算表明人类活动使得河水 TDS 含量增加了 435mg/L,而地下水 TDS 历史时期的增量也接近.4)山前冲洪积扇河水入渗是区域地下水补给的重要来源,是地下水污染防控和调水工程实施的重点区域.

关键词: 地下水; 水化学; 同位素; 演化; 时空变化

中图分类号: X523,X703.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)04-1847-07

Hydrochemical characteristics and spatial-temporal variations of groundwater in the Liangshui River basin, Beijing. LI Jie*, JIANG Ying, LIU Yu-lian, JIANG Ya, TENG Yan-guo (College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2022,42(4): 1847~1853

Abstract: We present a case from Liangshui River catchment to investigate and quantify the reasons for these changes. Results indicate that the groundwater with poor quality are limited at depths less than 100m. Shallow groundwater and river samples plot on the same meteoric water line, which indicates river seepage is one of the important controlling factors for groundwater quality. Meanwhile, the hydrogeologic structure of the study area indicates the groundwater is primarily recharged from river seepage in upper alluvial-proluvial plain, which should be considered an important protected region. Anthropogenic contamination added about 435mg/L both in the river and shallow groundwater. Although groundwater pollution is observed at shallow depths, the trend is likely in stable state indicated by the steady TDS values over the most recent seven years. In order to mitigate groundwater pollution, limits on pumping phreatic aquifer water and channel anti-seepage treatment measures are put forward for consideration.

Key words: groundwater; water chemistry; stable isotopes; evolution; spatial-temporal variations

地下水是人类赖以生存的水资源的重要组成部分^[1-2],尤其在干旱半干旱地区,地下水作为不可替代的主要供水水源被长期开采.为了充分利用和合理保护地下水资源,防止和控制地下水污染,保障人民身体健康,促进经济建设,了解区域地下水水质的时空变化特征以及其影响因素至关重要.

全球快速发展的城市化进程使得城市水问题愈发突出.根据联合国人口署的预测,2030 年世界上每个发展中国家或地区的城市化率都将超过 50%,2050 年将有 2/3 的人口居住在城市^[3].北京作为国际上为数不多的以地下水作为主要供水水源的大都市,城市水文问题突出.长期以来,由于地表水的匮乏,北京市的工农业和生活用水主要靠地下水,地下水利用占北京全市供水量的三分之二^[4].一方面,由于地下水长期超采,区域地下水位出现大幅下降,并产生地面沉降和地裂缝等环境地质问题^[5-8].与此同时,因城市快速发展而产生的人为污染改变了地下水环境,地下水水质问题日益突出.这使得以地下

水为主的工农业生活用水难有安全保障,严重制约了地区经济发展与社会进步.为缓解北京乃至华北水资源危机,国家级的跨流域跨省区的调水工程南水北调应运而生.其中中线一期工程于 2014 年汛后建成并通水,每年从丹江口水库调 10 亿 m³ 水经湖北、河南和河北引入北京.南水入京后,在一定程度上缓解了北京市地下水超采的严峻形势,地下水在北京市供水总量上所占比例由原来的 2/3 以上降至 50%左右^[4].同时北京市为涵养地下水资源,利用南水北调工程来水、官厅水库、密云水库等水源相继实施了潮白河、永定河等河道生态补水工作,有效促进了全市平原区总体地下水水位显著回升,生态补水区域周边地下水水位回升更为显著^[9-11].

总的来说,受人类活动影响,作为水循环组成要素的地下水的补给和演化条件发生了变化,因此重

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: 北京市高精尖学科“陆地表层学”资助

* 责任作者, 讲师, lijie_lm@163.com

新判定区域地下水的水化学特征和演化规律对于区域地下水污染防治意义重大.了解地下水循环规律是河道生态补水对地下水的响应评价的科学基础.为此,本文选择潮白河下游的凉水河流域,通过不同井深的地下水样品和河水样品的采集、测试和分析工作,了解区内地下水水化学和同位素特征及其演化规律,进而对地下水污染防治提出科学建议,并帮助评估南水北调来水河道补给对于区域地下水补给的影响.

1 研究区概况

北京属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候区,多年平均降水量约 600mm^[12].地跨山区和平原两大地理区,东南部属于山前冲洪积平原.凉水河是北运河的支流,发源于丰台后泥洼村,先后流经丰台区、大兴区、通州区,后汇入到北运河.全长 58km,流域面积 630km².

研究区地下水主要为第四系孔隙水,水文地质特征表现为基岩埋深从西向东递增,第四系地层主要包括砂卵石层、砂石层和粉质黏土层,厚度为 50~300m,并自西向东逐渐增大.岩性由粗颗粒转变为细颗粒,层次由单层变为多层,地下水水位由深变浅.冲洪积扇顶部地区,为单一的砂卵石含水层,大气降水入渗及河水入渗条件良好,是平原区地下水的主要补给区;冲洪积扇的中上部地区,砂卵石层与粘性土互层,地下水由潜水过渡到承压水,富水条件较好;冲洪积扇中下部及冲洪积平原区,含水层结构由冲洪积扇中上部单、双层结构向下逐渐过渡到多层结构,颗粒由砂卵石逐渐过渡到粗砂、中砂、细砂、粉细砂为主.

2 采样与测试

2011 年、2012 年和 2017 年丰水期分别在研究区采集地下水样品共计 36 组,井深在 50~300m 之间.另外,2015 年采集河水样品若干件.地下水和河水的采样点位置分布如图 1 所示.

采集地下水样品时,记录其地理位置、坐标和地质构造等信息,待 pH 值、水温等参数稳定后再开始取样.利用多参数水质分析仪(HQ40D,HACH)现场测定水样品的 pH 值、ORP、EC、TDS 等参数.采集样品前,加入需采集的水样清晰采样瓶 3 遍.阳离子

样品经 0.22μm 滤膜过滤后,装入聚乙烯采样瓶,经 HNO₃ 酸化至 pH<2 后密闭保存;阴离子样品经 0.22μm 滤膜过滤后,装瓶密闭保存.样品分析测试是在北京核工业地质研究院完成,地阴离子的测试采用离子色谱(Dionex-500)测定.阳离子的测试采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定.阴阳离子平衡检验误差在 5%以内.同位素样品在中国科学院地质与地球物理研究所,采用激光水同位素分析仪(L1102-I,Picarro)测试完成,同位素比值 D/H 和 ¹⁸O/¹⁶O 用相对千分差 δ 表示为 δD(‰)和 δ¹⁸O(‰),即 $\delta = (R_{\text{Sample}}/R_{\text{Standard}} - 1) \times 1000$.

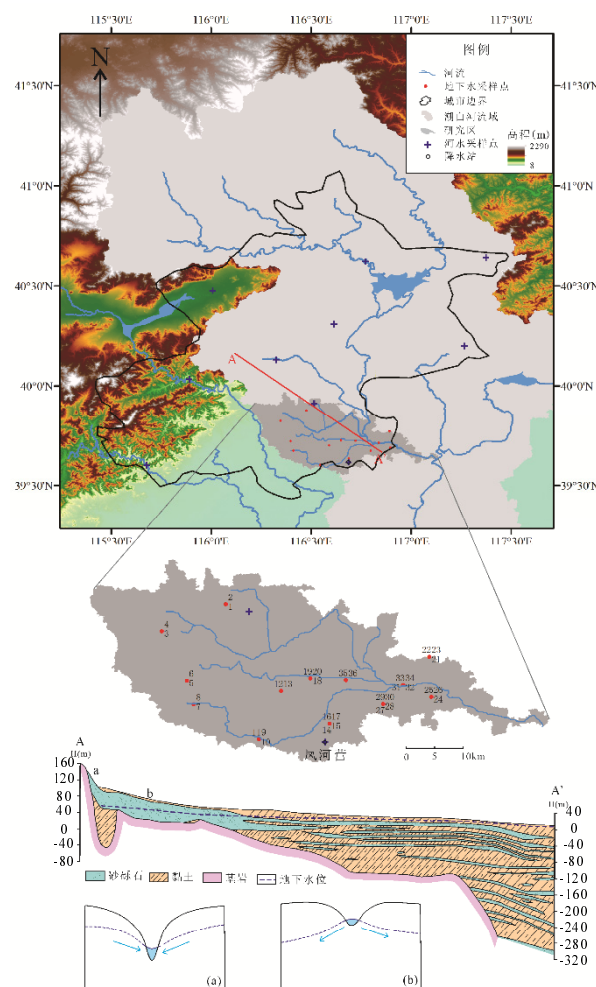


图 1 采样点位置图和水文地质剖面

Fig.1 Location of the study area and sampling sites and the schematic hydrogeological cross section

(a)地下水补给河水 (b)河水补给地下水

3 结果与讨论

3.1 地下水水质垂向变化规律

研究区 2012 年的水化学特征随着井深表现出

一定的变化规律,pH 值随着深度的增加而增大(图 2a),深部的地下水属于封闭系统,与大气 CO_2 和土壤 CO_2 交换较弱,地下水污染风险相对较低.而浅部地下水属于开放系统,更容易受到自然因素或人类活动影响^[13].

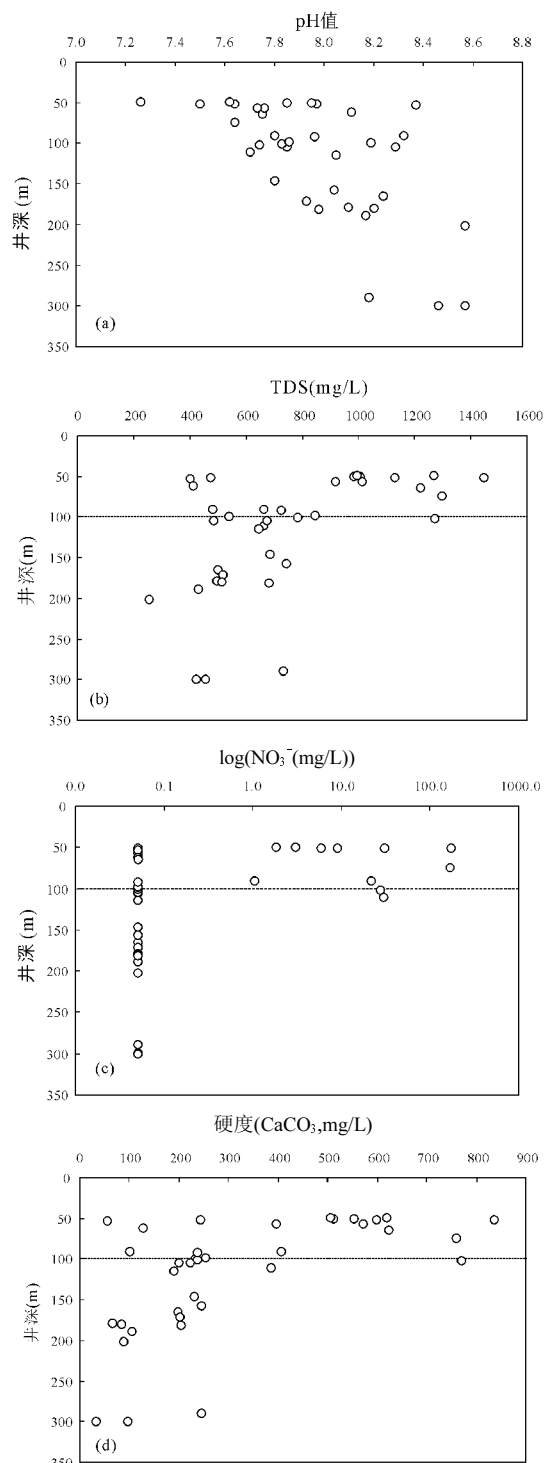


图 2 2012 年研究区 pH 值、TDS、硝酸盐、硬度与井深的关系

Fig.2 Plots of pH, TDS, Nitrate and hardness versus well depth for groundwater in the study area

图 2(b)和(c)分别展示了地下水总溶解固体 TDS 和硝酸盐含量与井深的关系.低的硝酸盐含量主要分布在井深大于 100m 的深部地下水;而高的硝酸盐含量主要分布在浅部地下水.这与前人在华北平原的研究结果^[14]一致.两个样品地下水样品硝酸盐含量很高,分别为 4 号(171.0mg/L)和 3 号(169.0mg/L).研究区的主要土地利用类型为农业用地,过度使用化肥是区域内地下水硝酸盐含量明显升高的主要原因^[15].浅层地下水通常是年轻地下水(年龄小于 60 年)^[16],而高硝酸盐含量在浅层地下水发现与区内化肥施用历史也是高度吻合的,中国大量使用化肥开始于 1950s~1960s^[17-18].除了两口硝酸盐含量明显超标的地下水水井之外,研究区内另有 9 口地下水井中检测到硝酸盐,含量在 1.0~31.0mg/L 之间,低于 WHO 规定的饮用水标准(50mg/L),但是作为地下水水质存在风险的重要因素,需要密切监测.华北平原曾过量施用化肥,引起包气带中硝酸盐过量累积^[19-20],但是从研究区地下水硝酸盐数据来看累积的硝酸盐尚未集中到达地下水.

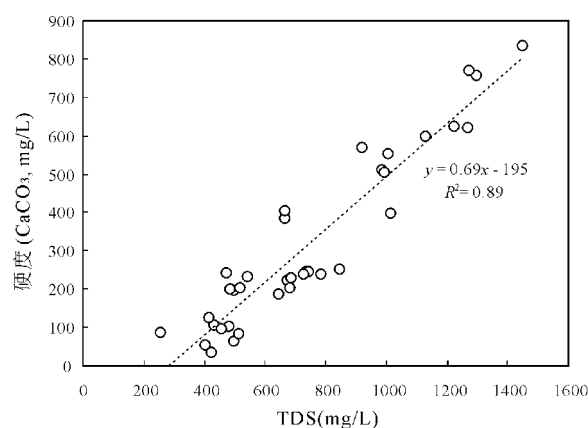


图 3 硬度与 TDS 的相关关系

Fig.3 Plot of TDS versus hardness for groundwater in the study area

总溶解固体(TDS)代表了水中溶解物杂质含量,一般说来,流程越长,TDS 值越大.地下水 TDS 与硬度随井深的关系与硝酸盐分布类似,高的 TDS 含量(大于 800mg/L)和高的硬度(大于 300mg/L)主要分布在 100m 以浅的地下水样品中(图 2b、d),进一步表明人类活动主要对浅层地下水水质产生影响.硬度升高主要是由于钙离子和镁离子溶解增加导致的,这可以看作人类活动影响地下水的重要指标.城市废水排放和农业灌溉等人类活动可引起地下

水中 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量升高,进而和地下水钙镁离子发生离子交换.另外,受浅表污染导致的有机物降解影响,浅表 CO_2 含量升高, pH 值降低、 HCO_3^- 增加,进而引起富含钙镁矿物溶解.TDS 与硬度之间存在很好的相关关系(图 3),这表明控制 TDS 和硬度的主要因素是一致的,主要受人类活动影响.

3.2 地下水水化学特征的时间变化

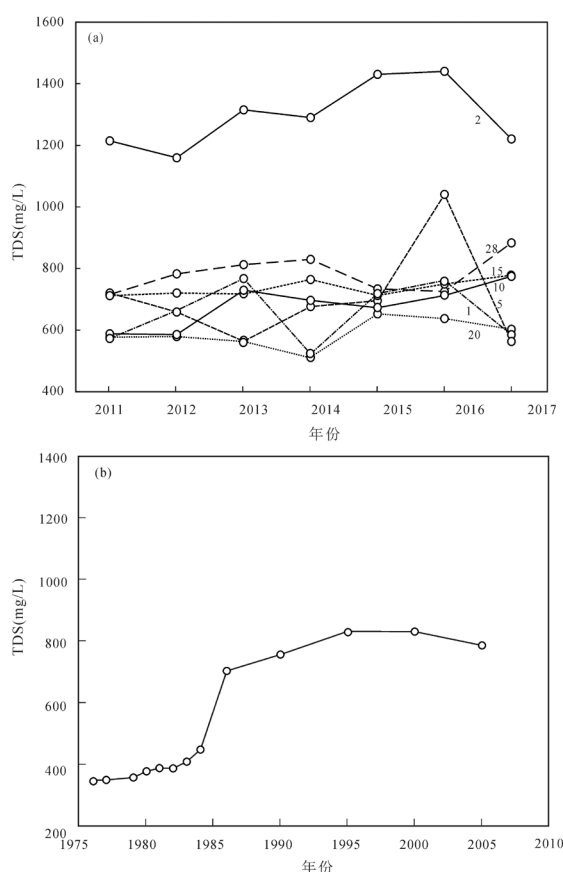


图4 2011~2017 年与历史时期^[21]TDS 随年份的变化

Fig.4 TDS variation by year from 2011 to 2017 observed at seven wells in the study area and TDS variations by year in a monitoring well in the North China Plain^[21]

2011~2017 年,地下水 TDS 含量基本保持不变(图 4(a)),这说明地下水水质在这段时间内基本保持稳定.图 5 为 2011 年和 2017 年地下水的水化学类型变化,可以看出地下水在 piper 三线图上的分布变化不大,地下水水质相对稳定.沿着地下水流向,地下水水化学类型基本符合干旱内陆盆地地下水演化的分带性特征.沿径流方向,地下水 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 离子含量降低, Cl^- 和 Na^+ 含量增加.浅部地下水化学类型出现了 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Na}$, $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Mg}$,

$\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 等多种水化学类型,反映了工业和城镇生活的影响.深部地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水为主.图 6 为地下水硝酸盐含量的变化,可以看到,与 2012 年类似,大于 100mg/L 的硝酸盐含量也只有两个样品点.但是,2017 年的硝酸盐含量还略低于 2011 年.这说明地下水水质在过去几年保持稳定,人类活动并未加剧对区域内地下水水质的影响.

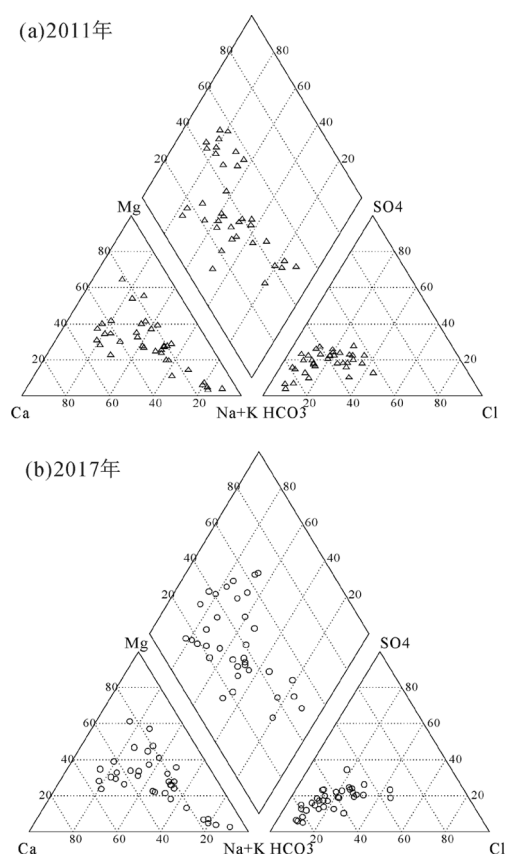
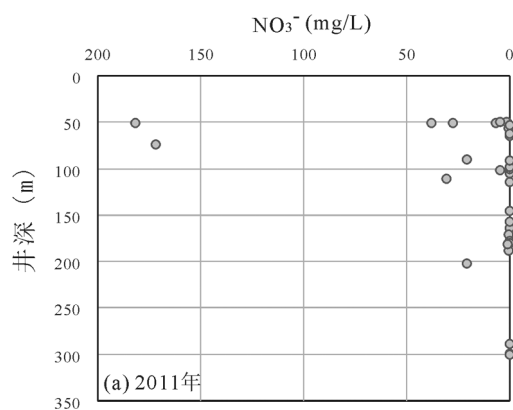


图5 2011 年和 2017 年地下水 piper 图

Fig.5 Piper diagram of major ions in groundwater during the year of 2011 and 2017



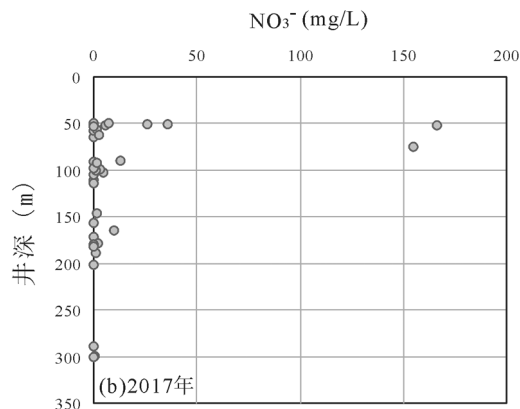


图6 2011年和2017年地下水硝酸盐含量的变化

Fig.6 Comparison of the variations of NO_3^- concentrations from 2011 to 2017

3.3 地下水水质的影响因素分析

氢氧同位素是水分子的直接组成成分,直接参与水循环过程,因而是水循环的一种良好天然示踪剂.图7为区域地下水和河水的氘氧关系.可以看到,深层地下水相对贫化,分布趋势大致平行于大气降水线.而浅层地下水同位素相对富集,与河水的分布范围较为一致,分布趋势较大气降水线斜率小,可能受到蒸发的影响.

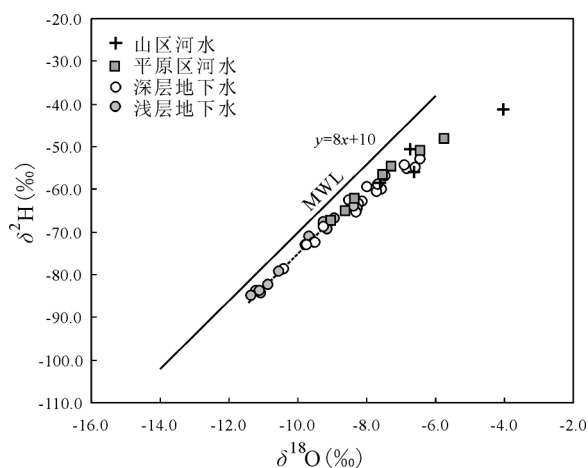


图7 地下水氘氧同位素关系

Fig.7 The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of groundwater and river samples

图8为河水和地下水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 与TDS的关系.其中山区河水TDS相对稳定,大约在200mg/L,与常见大气降水的TDS含量13~92mg/L^[22]存在差异,这是因为在山区,通常河谷较深,溶解有大

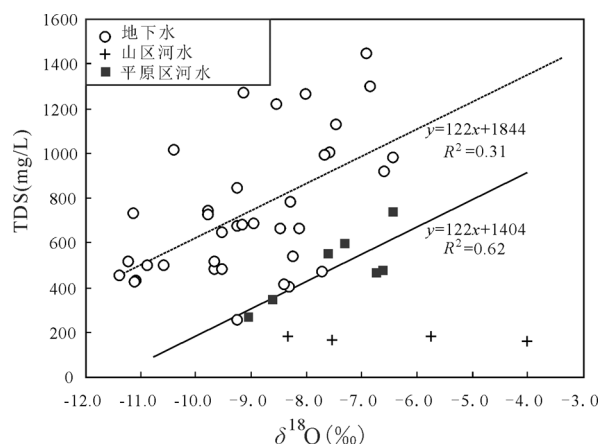
量矿物的高TDS的地下水由于水位较高而补给河水,使得河水TDS明显高于降水.而到了平原区,

河水位较高,可以补给浅层地下水,因此平原区河水同位素与TDS存在较好的相关关系,假设蒸发是控制河水TDS变化的主要因素,根据瑞利分馏公式,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 存在如下关系:

$$\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_0 = \varepsilon \ln f$$

其中 $\delta^{18}\text{O}$ 为蒸发后样品的同位素值,假设为平原区同位素最富集的河水样品(-6.4‰). $\delta^{18}\text{O}_0$ 为初始同位素值,假设为平原区最贫化的河水样品(-9.0‰).富集系数 ε 假定为北京平均温度(11.7℃)和平均湿度(56%)条件下的-15.6‰.因此,可以计算得到剩余水的比例为85%.依据质量平衡原理,如果蒸发是河水TDS变化的主控因素,那么发生蒸发后河水TDS含量应为 $C = \frac{C_0}{f} = \frac{264\text{mg/L}}{0.85} = 311\text{mg/L}$.其中 C_0 对应

着河水最小的TDS含量.事实上河水最大的TDS含量为737mg/L,因此必然存在其他因素影响河水的TDS变化.假定这个因素是受人类活动影响的,那么人类活动的影响使得河水的TDS增加了737-311=426mg/L.值得注意的是,历史时期地下水的TDS含量大致增加了785-350=435mg/L(图4(b)).河水受人类活动影响的TDS增加量与历史时期地下水TDS的增量基本一致,进一步证明了前文分析认为地下水TDS的增加主要是受人类活动影响的观点.

图8 河水和地下水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 与TDS的关系Fig.8 The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and TDS of waters in the study area

3.4 对地下水污染防控与人工补给的指示

出口口以后,河水水位通常高于地下水水位(图1(b)),河水补给地下水,这种情况下受到蒸发的河水可以补给到地下水,使得浅层地下水同位素也有一

定的蒸发信号(图 7).然后经过侧向径流继续向下游补给.随着地下水继续向下游流动,它与浅层地表水之间的水力联系不再紧密.因此,在区域河水与地下水的 Piper 三线图(图 9)上表现出明显不同的河水与地下水之间的水化学类型.这主要是因为凉水河功能定位是排水纳污^[23],水质不佳,为防止污水通过河道下渗进入地下水,在整治工程中对自然河道做的防渗措施^[24]等,限制了地表水向地下水的补给.因此,地下水主要在冲洪积扇前端,接收河水补给.在地下水污染防控过程中,需要重点关注上游区域.

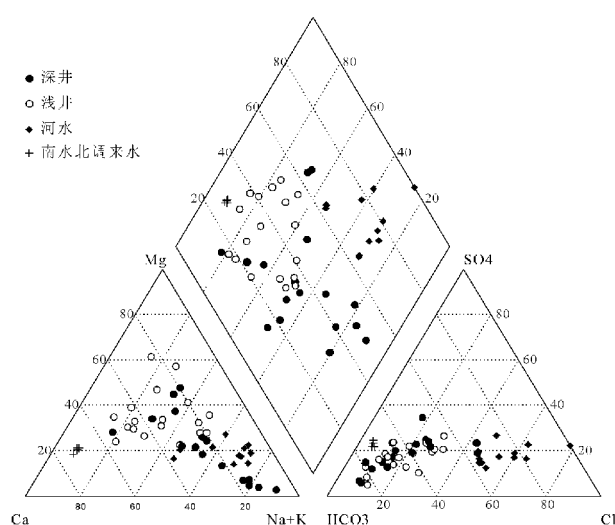


图 9 河水与地下水 Piper 三线图

Fig.9 Piper diagram of major ions in groundwater and rivers

另一方面,河道入渗补给是地下水人工补给的重要手段之一.北京市为涵养地下水资源,利用南水北调工程来水、官厅水库、密云水库等水源相继实施了潮白河、永定河等河道生态补水工作,有效促进了全市平原区总体地下水水位显著回升,生态补水区域周边地下水水位回升更为显著^[9-11].与补水前对比,陈家庄至卢沟桥段永定河沿线 10km 以内 10 眼监测井地下水位半年内平均回升 4.2m,卢沟桥至房山夏场段沿线 10km 以内 10 眼监测井地下水位平均回升 0.96m^[25].那么河道补水的关键区域也应该集中在区域上游,尤其是冲洪积扇顶部的单层砂卵砾石层.事实上,这一区域受人类活动影响显著,例如由于地下水强烈开采,华北平原山前地下水的无氧水的垂向深度已经从 1985 年的 100m 增加到 2000 年的 150m^[26],年轻的地下水更快向深部运移.这种人类活动诱导的地下水运动使得浅部污染更容易

进入到地下水深部,并通过侧向径流进入到其他区域.南水北调来水取潮白河流域京密引水渠南水放水时期,其水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型.课题组 2019 年多次在南水放水时期采集河水样品,测试结果与李炳华等^[27]的数据基本保持一致.从水质上讲,地表水与地下水的相互作用影响着水化学成分分布和演变规律^[28],南水与原有河水之间存在明显的水化学差异,而南水北调来水与浅层地下水更为接近.由于水化学类型接近,不同水源混合可能引起的水岩相互作用相对较弱.另外,南水水质相对较好,长期持续补给可能会改善区域内浅层地下水水质.南水北调来水河道补给区域地下水的效果,需要进一步结合水位和水质数据进一步评估.

4 结论

4.1 地下水的 TDS 含量、硝酸盐浓度、硬度等指标的高值主要分布在 100m 以内的井深范围内.这主要受人类活动影响.2011~2017 年,地下水 TDS 保持稳定,人类活动并未对地下水水质恶化产生进一步影响.

4.2 从定量的角度讲,受人类活动影响,区域地下水和河水的 TDS 值明显升高,增量大致在 430mg/L.

4.3 氡氧同位素和水化学证明表明地下水主要在冲洪积扇顶部的单层砂卵砾石层发生补给,这一区域是地下水污染防控和调水补给的重点区域.

参考文献:

- [1] de Graaf I E M, Gleeson T, (Rens) van Beek L P H, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping [J]. *Nature*, 2019,574:90-94.
- [2] Döll P, Schmied H M, Schuh C, et al. Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites [J]. *Water Resources Research*, 2014,50:5698-5720.
- [3] Mark R M. The urban transformation of the developing world [J]. *Science*, 2008,319:761-764.
- [4] 北京市水务局.北京市水资源公报 2015~2018 [Z]. <http://www.bjwater.gov.cn/pub/bjwater/gzhd/>. Beijing Water Authority. Beijing water resources Bulletin 2015~2018 [Z]. <http://www.bjwater.gov.cn/pub/bjwater/gzhd/>.
- [5] 刘记来.北京应急地下水源地开采极限研究 [D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2010.
Liu J L. Research on the exploitation limit of emergency groundwater source in Beijing [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics,

- Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [6] Aji K, Tang C, Song X, et al. Characteristics of chemistry and stable isotopes in groundwater of Chaobai and Yongding River basin, North China Plain [J]. *Hydrological Processes*, 2008,22:63–72.
- [7] 李文鹏,郑跃军,郝爱兵.北京平原区地下水位预警初步研究 [J]. *地学前缘*, 2010,17(6):166–173.
- Li W P, Zheng Y J, Hao A B. A preliminary study of groundwater level pre-warning in Beijing Plain [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010,17(6): 166–173.
- [8] 张安京.北京地下水 [M]. 北京:中国大地出版社, 2008
- Zhang A J. *Groundwater in Beijing* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [9] 张景华,范久达,李世君.南水北调进京后怀柔应急水源地下水水资源涵养研究 [J]. *城市地质*, 2015,10(2):17–20.
- Zhang J H, Fan J D, Li S J. Research on the groundwater resources conservation of Huairou emergency water source after the south-to-north water transfer into Beijing [J]. *Urban Geology*, 2015,10(2): 17–20.
- [10] 张大胜,吴 劲,张世伟,等.基于数值模拟的北京密怀顺地区地下水资源调蓄研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019,55(5): 627–634.
- Zhang D S, Wu J, Zhang S W, et al. Groundwater resources storage in Mihuanshun area of Beijing: a numerical simulation [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2019,55(5):627–634.
- [11] 何亚平,李世君,李 阳,等.南水北调对潮白河地区回补情况及水位影响分析 [J]. *北京水务*, 2019,(3):21–26.
- He Y P, Li S J, Li Y, et al. Effect of south-to-north water transfer project on recharge and water level in Chaobai river area [J]. *Beijing Water Authority*, 2019,(3):21–26.
- [12] Li J, Tao T, Pang Z, et al. Identification of different moisture sources through isotopic monitoring during a storm event [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015,16(4):1918–1927.DOI:10.1175/JHM-D-15-0005.1
- [13] 林学钰,王焰新,地下水科学 [M]. 北京:中国科学出版社, 2018.
- Lin X Y, Wang Y X. *Groundwater science* [M]. Beijing: China Science Publishing, 2018.
- [14] Chen J Y, Tang C Y, Sakura Y, et al. Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain [J]. *Hydrogeol J*, 2015,13:481–492.
- [15] Derby N E, Casey F X M, Knighton R E. Long-term observations of vadose zone and groundwater nitrate concentrations underirrigated agriculture [J]. *Vadose Zone J*, 2009,8:290–300.
- [16] Zhai Y Z, Wang J S, Huan H, et al. Characterizing the groundwater renewability and evolution of the strongly exploited aquifers of the North China Plain by major ions and environmental tracers [J]. *J. Radioanal Nucl. Chem.*, 2013,296:1263–1274.
- [17] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 1996,59:223–231.
- [18] 张玉铭,胡春胜,毛任钊,等.华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡研究 [J]. *应用生态学报*, 2003,14.11:1863–1867.
- Zhang Y M, Hu C S, Mao R Z, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and balance in farmland ecosystem at the piedmont of Taihang [J]. *Chinese J. Appl. Ecol.*, 2003,14:1863–1867.
- [19] 付玉芹,雷玉平,郑 力,等.不同施氮水平下深层土壤硝态氮淋失特征研究 [J]. *中国农学通报*, 2006,(6):245–248.
- Fu Y Q, Lei Y P, Zheng L. Nitrate leaching characteristics in deep soil layer for different fertilization methods [J]. *Chinese Agr. Sci. Bull.*, 2006,22(6):245–248.
- [20] Guo Y H, Xu G Q, Gao Z Y, et al. Nitrate in groundwater and the unsaturated zone, Shijiazhuang City, China. In: *Application of isotopes to the assessment of pollutant behaviour in the unsaturated zone for groundwater protection* [J]. IAEA-TECDOC-1618,IAEA, 2019:31–66.
- [21] 张兆吉,费宇红,陈宗宇,等.华北平原地下水可持续利用调查评价 [M]. 北京:地质出版社, 2009.
- Zhang Z J, Fei Y H, Chen Z Y, et al. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the North China Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:471.
- [22] Zhai Y Z, Wang J S, Zhang Y, et al. Hydrochemical and isotopic investigation of atmospheric precipitation in Beijing [J]. *China Science of the Total Environment*, 2013,456–457:202–211.
- [23] 周 福,潘安君,楼春华.北京市县域内水环境治理研究 [J]. *中国水利*, 2001,(5):46.
- Zhou F, Pan A J, Lou C H. Research on water environment management in the county area of Beijing [J]. *China Water Resources*, 2001,(5):46.
- [24] 赵 刚,史 蓉,庞 博,等.快速城市化对产汇流影响的研究:以凉水河流域为例 [J]. *水力发电学报*, 2016,35(5):10.
- Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: Case study for Liangshui River basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016,35(5):10.
- [25] 生态补水影响区域地下水动态周报(第三十三期) [Z]. 2019–11–29. 北京市水文总站.
- Weekly report on groundwater dynamics in areas affected by ecological water replenishment (issue 33) [Z]. 2019–11–29. Beijing Hydrological Station.
- [26] Cheng Z S, Zhang Y B, Su C, et al. Chemical and isotopic Response to intensive Groundwater abstraction and its implications on aquifer sustainability in Shijiazhuang, China [J]. *Journal of Earth Science*, 2017,28(3):523–534.
- [27] 李炳华,孟庆义,黄俊雄,等.地下水回补污染风险防控及生态修复技术 [M]. 北京:化学工业出版社, 2021.
- Li B H, Meng Q Y, Huang J X, et al. Groundwater recharge pollution risk prevention and control and ecological restoration technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- [28] 朱金峰,刘悦忆,章树安,等.地表水与地下水相互作用研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(8):3002–3010.
- Zhu J F, Liu Y Y, Zhang S A, et al. Review on the research of surface water and groundwater interactions [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(8):3002–3010.

作者简介: 李 捷(1988–),女,山东日照人,讲师,博士,主要从事同位素水文学研究.发表论文 30 余篇.