

张家口地区地下水资源与环境质量现状及开发利用保护建议

蒋万军^{1,2}, 孟利山^{1,2}, 柳富田^{1,2}, 刘宏伟^{1,2*}, 张 竞^{1,2}, 宁 航^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170)

摘 要:了解地下水资源与地下水环境质量现状, 对于旱-半干旱地区地下水可持续利用具有重要意义。通过资料搜集对张家口地区地下水资源开发利用现状进行了较为系统的梳理; 采集177组地下水样品进行水化学特征分析, 参照《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)选取22项指标进行水质评价, 揭示该地区地下水环境质量概况。研究表明, 地下水多年平均供水量为1.92亿m³, 占供水总量的78.69%; 近十年以来, 地下水资源承担了居民生活和工农业发展的主要供水任务, 导致多地区地下水位持续下降。坝上高原地下水质量总体一般, 满足III类水质标准的样品占比仅为44.44%, 主要超标物质为氟化物、总硬度和TDS; 相反, 坝下盆地地下水质量总体较好, 70.73%的样品符合III类水质标准要求。其中, 水文地质条件是影响高氟地下水分布的主要控制因素, 而人类活动输入硝酸盐对地下水化学组分的影响不容忽视。本文为张家口地区地下水污染防治、地下水资源保护与优化配置提供了科学依据。

关键词:地下水资源; 地下水环境质量; 科学依据; 张家口地区

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2022)03-0044-11

地下水作为人类自然资源的一部分, 是世界上最大的淡水储存库, 为全球范围内三分之一淡水资源的来源。尤其是在干旱-半干旱或半湿润的国家和地区, 地下水不仅为大部分人提供宝贵的淡水资源, 还支持农业种植和工业生产活动, 在人类生活、生态系统和可持续发展中发挥着越来越重要的作用^[1-2]。然而, 在气候变化和人类活动的影响下, 世界上许多国家都面临着水资源短缺、水污染、极端水文事件频繁发生等水资源与环境问题的压力^[2]。区域水资源供需矛盾和水环境质量已成为世界上许多发展中国家最严重的发展问题之一^[3-8]。

近年来, 随着社会经济的快速发展和城镇化的建设, 我国地下水的长期不合理开发利用以及人类活动造成了地下水位持续下降、水质恶化等一系列水资源短缺和环境污染问题^[3,9-12], 区域水资源短缺给城市尤其是华北地区的可持续发展带来了巨大的挑战^[2,6,13-17]。张家口地区是一个水资源严重匮乏的地区, 尤其是近几年来随着人口激增和工农业的快速

发展, 水资源短缺和环境恶化问题日益突出, 水资源的过度消耗和环境污染给张家口地区的生态环境带来了巨大的压力^[17-21]。

在地表水资源逐渐减少的情形下, 作为一种特殊的淡水资源, 地下水资源在张家口地区扮演着越来越重要的饮用水源角色。为了满足张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区“双区”建设的需求, 全力保障水资源和生态环境安全, 查明张家口地区地下水资源和地下水环境质量现状显得愈发重要。本文回顾了张家口地区地下水资源和地下水环境质量所开展的相关研究, 通过对所取177组地下水水化学特征分析并进行水质评价, 揭示该地区地下水环境质量概况, 为该地区地下水资源开发利用与保护提供合理的参考建议。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

张家口位于北京、河北、山西和内蒙古四省市

收稿日期: 2021-11-03

资助项目: 中国地质调查局项目“河北张家口地区综合地质调查(DD20190820); 内蒙古内陆河及海河北系水文地质与水资源调查监测(DD20221759)”

作者简介: 蒋万军(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 毕业于中国地质大学(北京), 水文地质学专业, 主要从事同位素水文地球化学、地下水循环与演化、地下水环境等方面研究, E-mail: jiangwanjun0718@136.com; *通讯作者: 刘宏伟(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、海水入侵等研究, E-mail: liuhenry022@163.com。

交界处,地理坐标为东经 $113^{\circ}50'$ ~ $116^{\circ}30'$,北纬 $39^{\circ}30'$ ~ $42^{\circ}10'$,面积共约 $36\,800\text{ km}^2$ 。其北部为阴山余脉,紧临内蒙古高原,南部为太行山山脉(图1)。张家口地区地势变化较大,地形较为复杂,其地貌可划分为坝上高原和坝下山间盆地两个不同的地貌单元。其中坝上地区地势较高,海拔在 $1\,300\sim 1\,500\text{ m}$ 之间;坝下地区有多个山间盆地组成,地势相对平坦,海拔多在 $500\sim 1\,000\text{ m}$ 之间。张家口大部分地区属于典型的寒温带大陆性季风气候,具有春秋干旱多风、夏季凉爽短促、冬季寒冷干燥的特点。受多变的气象因素和地形地貌因素等综合影响,张家口地区具有年内降水非常集中,年际变化较大的特点,其多年平均降水量约 $350\sim 400\text{ mm}$,多年平均蒸发量为 $850\sim 1\,200\text{ mm}$,因此可利用的地表水资源非常有限^[22-23]。坝上高原地区全年大部分时间受西伯利亚冷空气和蒙古高压影响,气候干燥,降水量较少而蒸发量较大,地表水多为季节性内陆河流,由南向北注入内陆湖泊,包括安固里河、大青河和五台河;坝下山间盆地主要有内陆河水系、滦河水系、海河流域的永定河水系、潮白河水系和大清河水系五大水系^[23-24]。

1.2 水文地质条件

张家口地区位于我国华北地带的北缘,由于其地质构造及水文地质条件都十分复杂,地下水资源的分布、赋存和运动规律差异性较大。依据地下水赋存条件和含水介质空隙特征的不同,可将地下水划分为4种类型:松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水、岩浆岩裂隙水。其中坝上高原地区属内陆河流域,广泛分布第四系冲洪积、冲积和湖积物等,含水层岩性主要为砂卵砾石、粗砂和粉细砂,一般厚度为 $10\sim 60\text{ m}$,富水性较差^[25];此外,在坝上高原南部隐伏玄武岩,裂隙较发育,厚度较大,富水性较好,泉水常见流量 $3.6\sim 18\text{ m}^3/\text{h}$,最大达 $81\text{ m}^3/\text{h}$,其主要补给来源为大气降水入渗补给,由山区向高原中心的湖淖汇集,蒸发和人工开采为其主要的排泄方式。坝下山间盆地主要由大小不等、条件各异的多个水文地质单元组成,广泛分布松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水,其中洋河桑干河两岸的带状冲积平原、冲积三角洲是盆地内地下水最为丰富的地段,井孔单位涌水量多达 $50\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ ^[26];山前各大冲洪

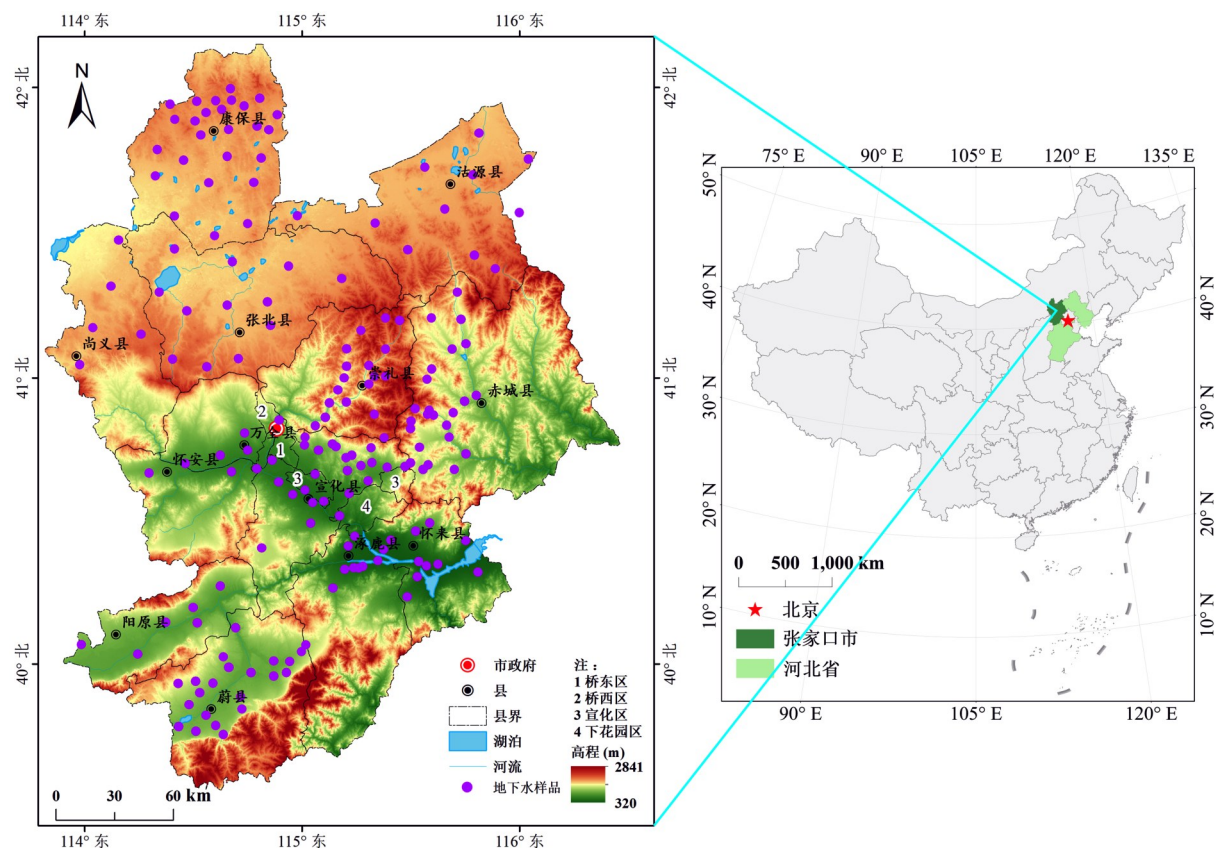


图1 张家口市地理位置及取样点

Fig.1 Map of the geographical location and groundwater samples of Zhangjiakou city

积扇第四系堆积物厚度大,富水性较好,井孔单位涌水量常达 $30 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ 以上;山前坡洪积裙及扇间地带,含水层分布不均匀且厚度较小,一般富水性较差;坝下山间盆地地下水主要受大气降水入渗、山区地下水侧向径流和农业灌溉水补给,地下水径流主要受地形地貌及构造岩性因素的控制,由周围盆缘山地向盆地中心汇集,人工开采利用为地下水的主要排泄方式。

2 地下水资源和开发利用现状

目前,张家口市部分地区地下水超采导致水资源短缺和生态环境恶化,制约着经济社会的可持续发展。冬奥会举办城市这一特殊的荣誉吸引了更多的人口和各种企业搬到城市,导致该地区逐渐成为全国最严重的缺水地区之一^[20]。由于人类活动影响,致使地表产汇流规律发生了较大变化,同时随着水资源开发利用程度的提高,地下水的径流条件以及地表水与地下水之间的转化关系也可能相应发生了变化。如图2所示,根据《河北省水资源公报》(2009—2021年)的水资源监测数据显示,张家口地区水资源总量多年平均值为 14.90 亿 m^3 ;其中地表水资源量为 $4.06 \sim 9.75 \text{ 亿 m}^3$,多年平均值 6.16 亿 m^3 ;而地下水资源量为 $10.32 \sim 14.66 \text{ 亿 m}^3$,多年平均值为 12.63 亿 m^3 (二者重复计算量为 3.90 亿 m^3),占水资源总量的 84.77% ^[27]。此外,张家口地区多年用水量平均值为 2.44 亿 m^3 ,而地下水供水量为 1.92 亿 m^3 ,占供水总量的 78.69% 。从图2中可以看出,近十年以来,地下水

资源承担了张家口地区居民生活、城市公共、工农业发展的主要供水任务,而地表水和污水处理回用量仅占少量份额,甚至在某些年份(2017—2019年)地表水供水量为 0 亿 m^3 。基于水生态足迹模型与系统动力学模型相结合的预测结果表明,虽然水资源利用效率的提高缓解了区域缺水压力,但所获得的效率将在很大程度上被经济发展带来的用水需求增加所抵消;随着经济和人口的急剧增长,导致2007至2050年张家口年平均缺水量为 8.53 亿 m^3 ,占当地年平均水资源总量的近一半^[17]。因此,为了应对未来三十年严重的水资源短缺,必须重视科学的水资源管理和水污染控制^[17]。

近几年来,由于人口激增与工业废水的排放,使张家口原有短缺的水资源更加入不敷出^[18];大量的地下水开采导致出现了地下水位下降迅速、水库湖泊水体减少等一系列水环境问题^[19],使得当地的生态环境敏感而且脆弱。尤其是在坝上地区自从2000年以来大力发展农业,地表水资源用水量占总供水量的比重总体呈逐年下降趋势,区内主要依靠地下水为供水水源。目前地下水开采量占全区水资源利用量的 98% 以上,农业用水量占区内总用水量的 70% 以上,地下水资源的供给承担了越来越重的供水任务。随着工农业和城镇化的发展,地下水的开采量逐渐增加,1981—2015年张家口地区不同地貌单元及下辖各区县(坝上高原、柴宣盆地、涿怀盆地和蔚阳盆地)的地下水位呈整体下降趋势,并且下降速率逐步加快的时期主要为20世纪八九十年代和21世纪初期(图3)。其

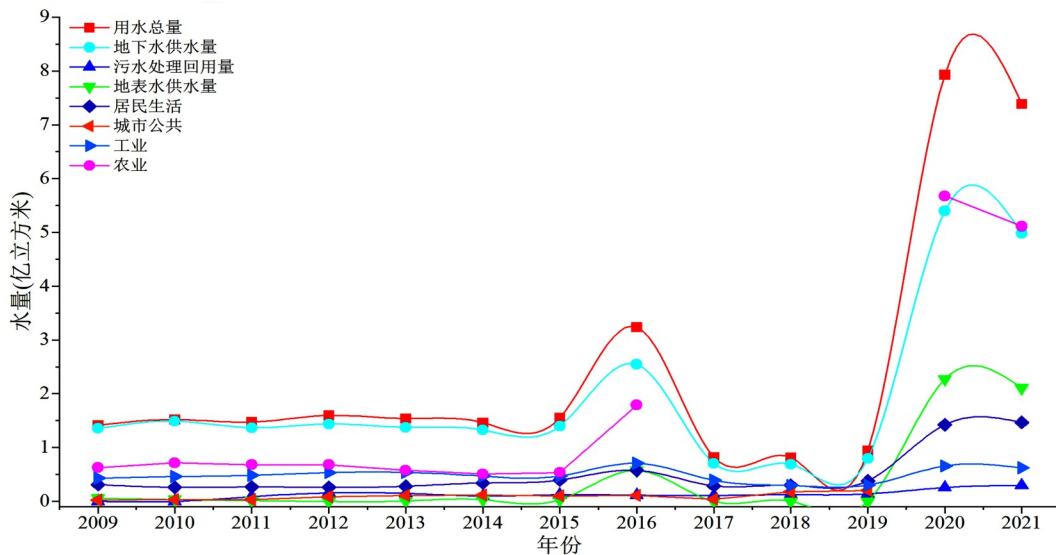


图2 张家口地区2009—2021年水资源及开发利用现状^[27]

Fig.2 Development and utilization of water resources in Zhangjiakou area from 2009 to 2021

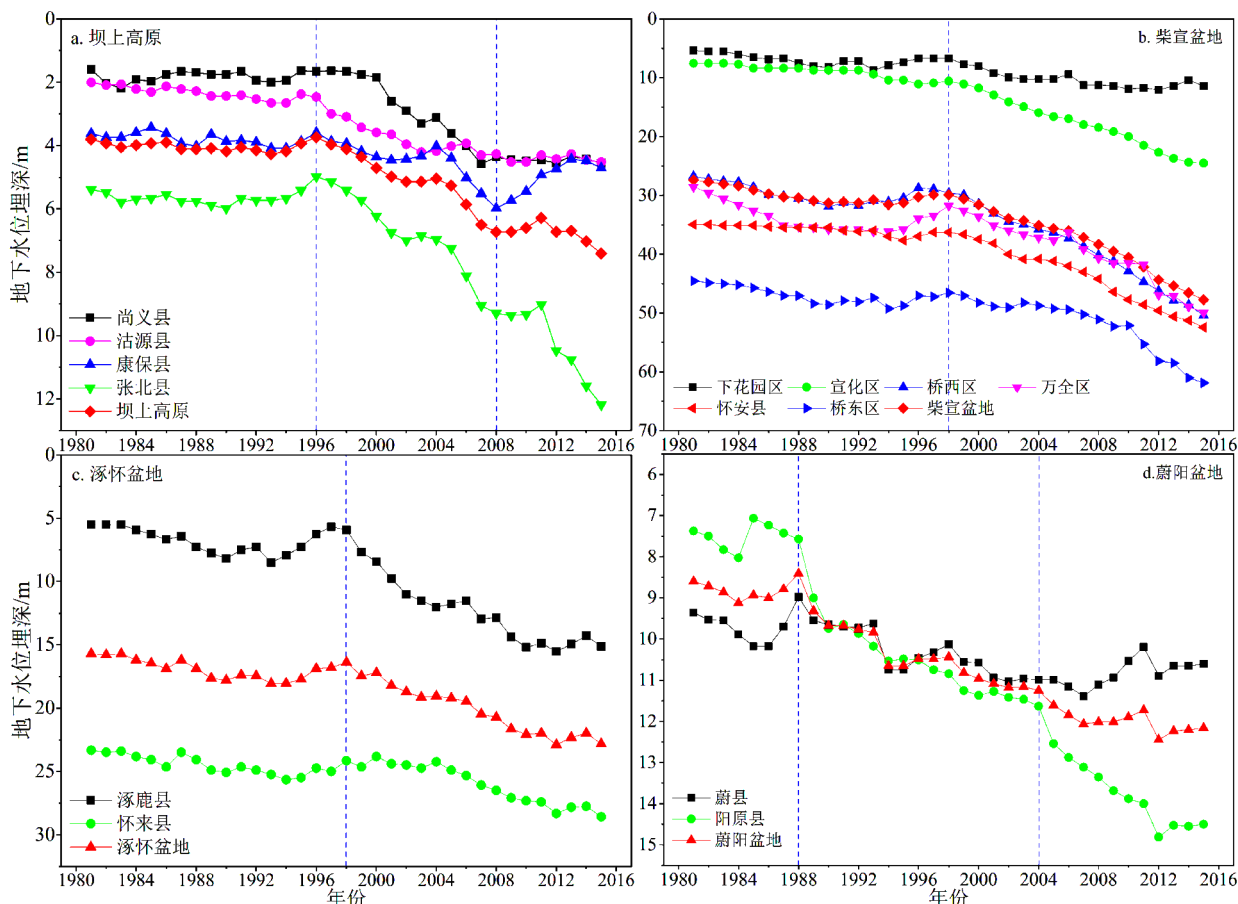
图3 张家口地区不同地貌单元1981~2015年地下水位动态变化^[30]

Fig.3 Dynamic changes of shallow groundwater level in different geomorphic units in Zhangjiakou area from 1981 to 2015

中,坝上高原地区平均地下水位埋深区间在4~10 m,总体呈下降趋势;坝下地区张宣盆地地下水位埋深最大,主要为25~45 m;涿怀盆地和蔚阳盆地地下水埋深相对较浅,分别为15~22 m和8~12 m,但整体地下水埋深同样地呈现逐年下降的趋势。

2000—2004年坝上地区地下水资源供水量从0.87亿 m^3 增加到1.37亿 m^3 ,地下水资源占总供水量的比重由77.5%上升到92.9%;而2004—2007年,地下水资源开采量呈快速增长趋势,从1.37亿 m^3 增加到2.31亿 m^3 ,其占总供水量的比重由92.9%上升到95.7%;2007—2017年地下水资源的供水量开始呈现缓慢下降趋势,从2.31亿 m^3 减少到1.45亿 m^3 ,供水比重也下降到了91.8%^[28]。由于消耗与补给失衡,坝上高原地区地下水位持续下降,导致地下水埋深持续加大,长期处于入不敷出的状态。由于地下水开采量较大,坝上地区部分河道河段出现断流现象,导致湿地萎缩严重,其中1 km^2 以上面积的24个淖泊已干涸20个。在坝下山间盆地地区,含水层厚度较大,富

水性较好,地下水资源量相对较丰富;但是随着近几年的大量的不合理开采利用,地下水位呈现多年持续下降的趋势,尤其是在1998—2015年,坝下各盆地地下水位呈快速下降的趋势,各地区降幅为4.43~20.83 m(图3)。其原因主要为坝下地区随着城镇化的快速发展和人口密度的不断增高,生活和工农业生产需水量较大,而当地供水十分依赖开采地下水,导致地下水资源开发利用程度较高。资料显示,直至2017年该地区全部生活用水、工业用水量的84.2%、农业用水量的64.1%、总用水量的74.6%通过开采地下水资源来满足^[29]。但是该地区人均水资源量仍然不足380 m^3 ,远低于全国人均2100 m^3 的水平,并且全市农业生产用水占该市水资源总量的70%以上,区域水资源短缺与可持续发展的矛盾日益突出^[17]。

3 地下水环境质量概况

工农业用地活动不仅生产粮食以满足日益增长的人类需求,而且还影响淡水资源的数量和质量,特

别是在有灌溉耕地的地区^[12,31]。根据以往的研究,农业灌溉占全球用水需求的70%,用于灌溉的地下水占全球灌溉用水需求的43%,这导致了地下水的过度开采^[32-33]。此外,灌溉水中的大量可溶性盐类以及农用化学品可能会进入地下含水层,对地下水水质产生深远影响^[34-36]。因此,精耕细作已被广泛报道为导致全球地下水位下降和农业化学品渗入地下水的原因^[34-36]。由于独特的地理位置,张家口被设计为北京的一个水资源保护区,但它是一个极度缺水且经济相对落后的地区。此外,当前张家口地区蔬菜产业的发展主要依靠抽取地下水资源,过度抽取导致当地地下水位迅速下降;由于张家口地区本身的地质背景原因,地下水所处的岩层和土壤本身的性状造成了地下水的水质恶化。

3.1 地下水水化学特征

坝上高原地区地下水的pH值范围为6.98~8.15,平均值为7.77;坝下盆地地下水的pH范围为7.12~8.92,平均值为7.85,可以看出张家口地区整体呈现出弱碱性地下水。此外,溶解性总固体(TDS)的分布特征可以反映地下水环境变化引起的水动力和水化学场漫长而复杂的演化,张家口地区地下水化学TDS分布特征(图4)。研究区坝上高原地下水样品的TDS相对较高,为92~2 580 mg/L,平均值694.07 mg/L,其中高原中部地区的11件样品超过了III级水质标准阈值(1 g/L),远高于南北两侧丘陵地区,属于微咸水。相对而言,除了蔚县-阳原县平原区的3个样品,坝下山间盆地尤其是山区地下水的TDS整体较低,均小于1 g/L,平均值为393.28 mg/L。

按照舒卡列夫分类法对张家口不同地区地下水化学类型进行分析。其中根据不同类型优势阴离子的毫克质量浓度所占比例,将区域内地下水主要阴离子水化学类型划分为 HCO_3 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4(\text{Cl})$ 型,局部地区为 SO_4 型、 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型、 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{NO}_3$ 型和 NO_3 型(图5);阳离子类型主要有Ca型和Ca·Mg型,部分样品中出现Mg·Ca型、Ca·Mg·Na型、Na·Mg型和Na型(图5)。

张家口坝上高原南北两侧的丘陵区 and 坝下盆缘山地、河间山地及山前倾斜平原上部广泛分布 HCO_3 型淡水(图5),该地区无连续隔水层分布,砂卵砾石裸露地表,直接接受当地大气降水入渗补给;含水层厚、颗粒较粗,多呈开放型单层结构且渗透性强,径流条件好,地下水循环交替频繁、地下水溶滤作用充

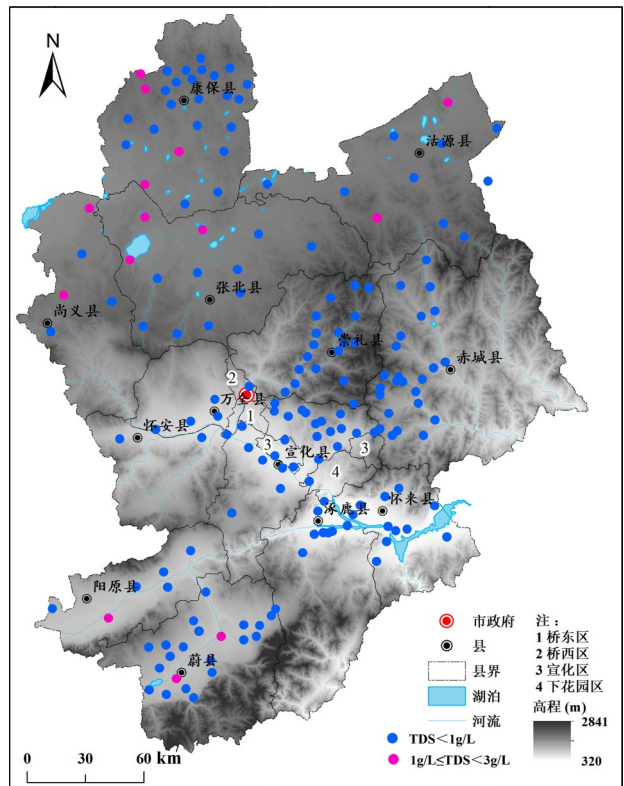


图4 张家口地区地下水TDS分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of TDS in groundwater in Zhangjiakou area

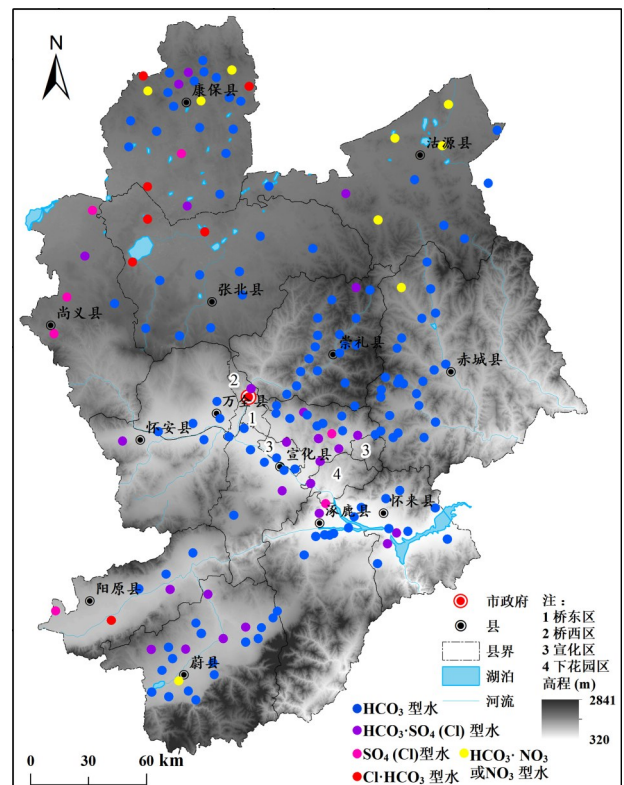


图5 张家口地区地下水化学类型分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of groundwater chemical types in Zhangjiakou area

分且无大型人类活动影响,因此水质相对较好,地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型或 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水为主。 HCO_3 型水主要为弱碱性地下水,pH值为7.12~8.42,溶解性总固体(TDS)小于1g/L(52~800 mg/L,图4)。随着地下水以径流的方式由坝上南北丘陵区或坝下盆地山区向高原中心或山前倾斜平原以及河流冲积平原做水平运动,由于区域内地形、含水层结构变化的影响,含水层岩性颗粒越来越细,径流条件由好逐渐变坏,地下水循环交替缓慢,蒸发为地下水的主要排泄方式,TDS、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的含量在蒸发浓缩的作用下不断地升高,地下水化学类型逐渐演变至 SO_4^{2-} 或 Cl^- 为主导阴离子类型,TDS为620~2 580 mg/L(图4,图5),以微咸水为主。此外,该地区人口集中,工农业发达,井渠、农业回灌和地表河水入渗也是区内地下水的重要补给来源,而灌溉水和地表水中的大量可溶性盐类以及农用化学品可能会进入地下含水层,对地下水水质产生深远影响。

值得注意的是,坝上高原地区的康保县和沽源县周边一带出现硝酸盐含量异常区,在地下水化学类型中 NO_3^- 为优势阴离子,其阳离子类型主要为 $\text{Na}\cdot\text{Ca}(\text{Mg})$ 。据野外水文地质调查可知,张家口坝上高原地区产业以农业和畜牧业为主,在大部分地区农牧业区呈现片状分布,而人类农业活动化肥和农药的大量投放、生活垃圾、禽畜粪便的堆放等人类生产活动导致地下水中硝酸盐含量升高是世界范围内普遍存在的问题。从地下水化学类型可以推断,在局部地区地下水化学成分可能受到人类活动影响较大,部分样品数据中阴离子类型出现 NO_3^- 或 $\text{HCO}_3\cdot\text{NO}_3$ 型地下水(图5)。

3.2 地下水水质评价

2003年已有学者根据《地下水质量标准》(GB/T14848-93)对张家口地区110口地下水监测井水质进行评价,结果表明地下水环境质量总体状况较差。其中I~III类地下水分布面积为13 378 km^2 ,占张家口地区总面积的36.2%;IV类地下水分布面积为6 086 km^2 ,占张家口地区的16.5%;V类地下水分布面积为17 501 km^2 ,占张家口地区的47.3%^[37]。由于水质不断地恶化,受到了人们越来越多的关注,2008年张家口市对饮用水源地保护区进行了重新划分,并根据《地下水质量标准》(GB/T14848-93)对饮用水源进行了水质评价,结果表明张家口市饮用水源地地下水质量虽然有所改善,但仍需要引起广泛的关注^[37]。

本次研究共选取指标22项对2020年所采集的样品进行地下水质量评价,参照《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)根据从优不从劣的原则采用单因子指数法进行水质评价,其中地下水质量常规指标:一般化学指标11项,参评项为pH、总硬度、TDS、硫酸盐(SO_4^{2-})、氯化物(Cl^-)、铁(Fe)、铜(Cu)、锌(Zn)、耗氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、钠(Na);毒理学指标9项,参评项为亚硝酸盐($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸盐($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、氟化物(F^-)、碘化物(I^-)、汞(Hg)、砷(As)、镉(Cd)、铬(六价, Cr^{6+})、铅(Pb)。地下水质量非常规指标:包括毒理学指标硼和镍(Ni)2项。

3.2.1 坝上高原地下水水质

张家口坝上高原地区共采集地下水样品54组,经过水质评价,其中有24组水样组分满足地下水质量III类水质标准,12组样品为IV类地下水,18组样品为V类地下水,超标率为55.55%。可以看出,坝上高原地区地下水质量总体一般,根据所采集样品测试数据及地下水质量评价,能够满足直接集中式生活饮用水水源及工农业用水(III类水质标准)的地下水仅占所取样品的44.44%;劣质水超标组分共有10项,其超标率由大到小依次为氟化物、总硬度、溶解性总固体(TDS)、硝酸盐、氯化物、硫酸盐、钠、COD、砷和碘化物,其余水质指标并无超标现象,而超标率大于20%的指标有氟化物、总硬度和TDS。此外,IV类水主要影响因子有氟化物、总硬度、TDS、硝酸盐、氯化物、硫酸盐、砷、COD、钠和碘化物,氟化物的贡献率最高,达到29.09%;其次是总硬度和TDS,各超标指标贡献率见图6a;而V类水主要影响因子有氟化物、总硬度、TDS、硝酸盐、氯化物和硫酸盐,其中总硬度的贡献率最高,达到33.33%,其次是硝酸盐、氯化物和硫酸盐,各超标指标贡献率见图6b。

3.2.2 坝下盆地地下水水质

张家口坝下地区共采集地下水样品123组,其中有87组水样满足III类地下水质量标准,26组样品为IV类地下水,10组样品为V类地下水,超标率为29.27%。能够满足直接集中式生活饮用水水源及工农业用水的地下水占所取样品的70.73%,反映出坝下地区地下水质量总体较好。然而,坝下地区地下水质量指标超标共有14项,其超标率由大到小依次为氟化物、总硬度、硫酸盐、砷、溶解性总固体(TDS)、硝酸盐氮、COD、硼、pH值、钠、亚硝酸盐氮、铬(六价)、汞和铅。其中超标率较高的指标有氟化物和总

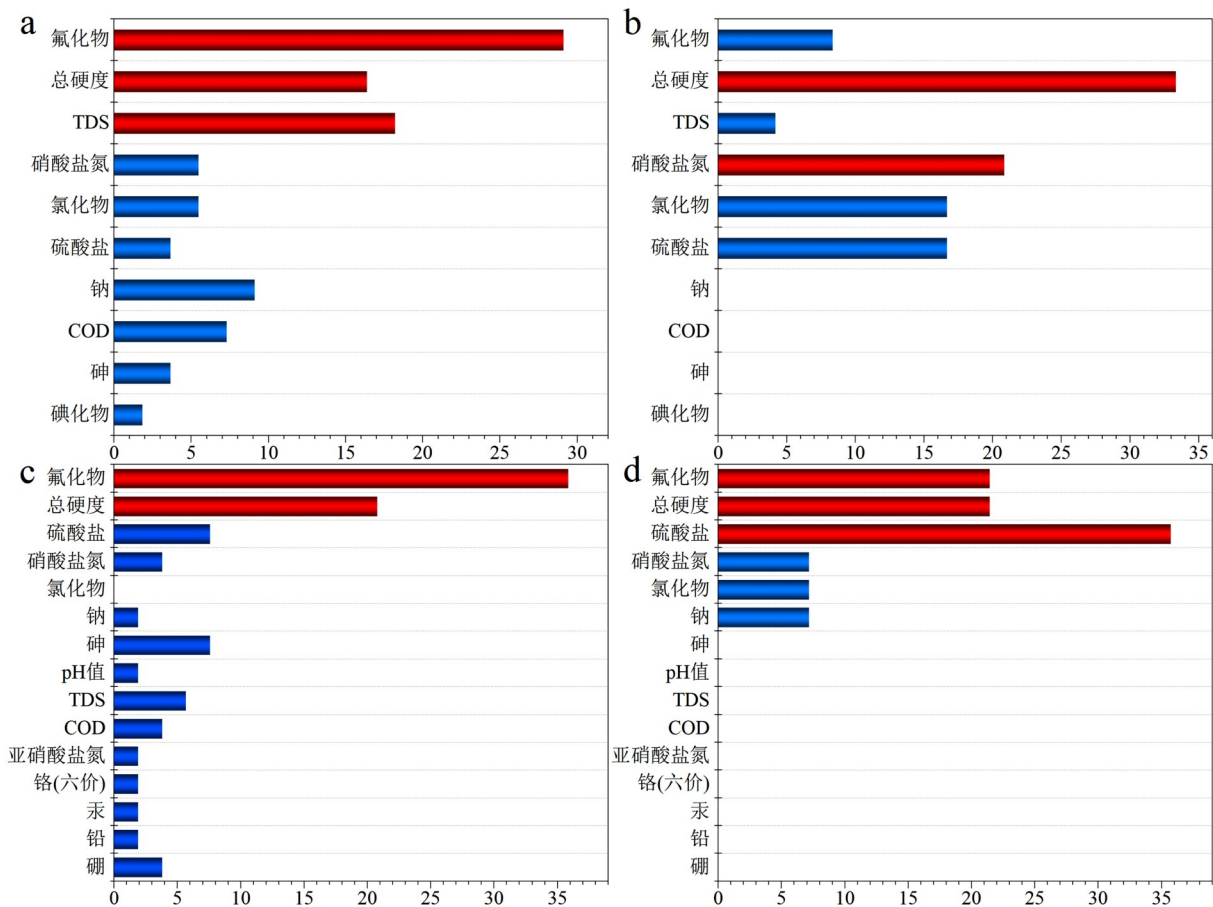


图6 张家口地下水超标指标贡献率:a和b分别为坝上高原Ⅳ类和Ⅴ类水超标指标贡献率;
c和d分别为坝下地区Ⅳ类和Ⅴ类水超标指标贡献率

Fig.6 Contribution rate of groundwater exceeding standard in Zhangjiakou: a and b are contribution rates of water exceeding standard of class IV and class V in Bashang Plateau respectively; c and d are the contribution rates of class IV and class V water exceedance indexes in Baxia area respectively

硬度,且氟化物的超标率最高,达17.89%,样品数据中氟化物最高浓度为3.71 mg/L。坝下盆地地下水样品Ⅳ类水主要影响因子有氟化物、总硬度、硫酸盐、砷、硝酸盐、pH值、TDS、COD、钠、亚硝酸盐和铬(六价),在所有超标组分中,氟化物的贡献率最高,达到35.85%,其次是总硬度,各超标指标贡献率见图6c;Ⅴ类水主要影响因子有硫酸盐、总硬度、氟化物、氯化物,而硫酸盐的贡献率最高,为35.71%,各超标指标贡献率见图6d。

3.2.3 地下水水质分布概况

根据研究区地下水质量评价的结果可知,能够直接或者适当处理后可饮用地下水样品主要分布在坝上高原南北两侧的高原丘陵区 and 坝下地区的盆缘山地、河间山地以及山前倾斜平原上部(图7)。这些地区为区域地下水补给区,含水层岩性颗粒较大,地下水补给条件好,降水和地表径流通过砂卵砾石垂

直渗入补给地下水;此外,该地区地下水径流路径短,循环交替频繁,并且受人类活动影响较少,因此水质相对较好。而所取样品中,水质评价结果为Ⅳ类或Ⅴ类地下水主要分布在坝上高原缓坡丘陵区、高原中心和坝下地区的张宣盆地、蔚阳盆地山前倾斜平原中部-前缘或者河流冲积平原,尤其是市区周边地下水中多数样品测试结果均超过地下水Ⅲ类水质标准。该类地区地表多有渗透性较差的薄层粘性土覆盖,含水层岩性颗粒越来越细,由于地形、含水层结构变化的影响,潜水位逐渐由深变浅,径流条件由好逐渐变坏,地下水循环交替缓慢,并且该地区人口密集,工农业活动比较频繁,受人类活动影响相对较大,因此地下水水质逐渐由好变差。

3.3 劣质地下水成因分析

值得注意的是,通过本次地下水质量评价,张家口坝上高原和坝下盆地部分地区均出现氟含量异常

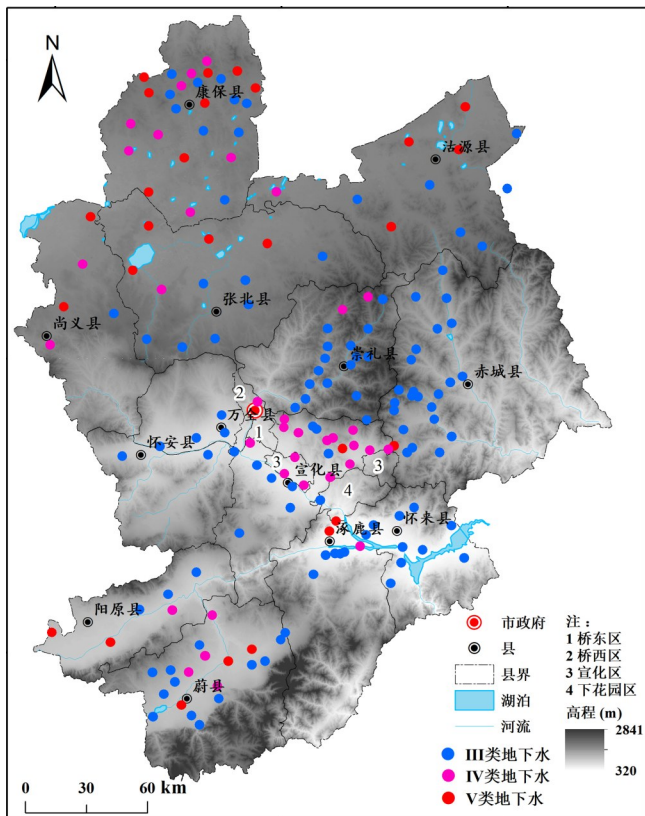


图7 张家口地区地下水质量分布概况

Fig.7 Groundwater quality distribution in Zhangjiakou area

区域,尤其是坝上高原地区地下水样品中,氟的含量为地下水质量标准中Ⅲ类水的数倍,这与前人的相关研究具有高度的一致性^[38-40]。在坝上高原地区地下水中存在较大的氟含量异常区域(氟化物含量最高可达7.79 mg/L的区域^[40]),例如张北县境内低洼地带,还有康保县周边,氟化物含量在1~2 mg/L;在尚义地区,出现了氟化物含量大于2 mg/L的区域。而一般近山地带,地下水径流较强烈,地下水交替频繁,氟含量小于1 mg/L^[40]。由于地层原生条件,富氟地层为该地区地下水中氟化物的来源和富集提供了地质背景,含氟矿物的水岩相互作用与离子交换作用是张家口地区高氟地下水的主要成因^[40-42]。虽然近山带氟化物来源异常丰富,溶滤作用比较充足,但由于地形碎裂导致地下水频繁交替,不利于F⁻的富集;而高氟地下水主要分布在坝上高原中部的起伏平原和坝下河流域山前坡平原或冲积平原的中前部分,随着含水层中粘土含量比例的增加,地下水滞留时间较长,循环交替缓慢且溶滤效果不充分,使得F⁻容易富集;此外,平原区和低洼区地下水以垂直交替运动为主,在地下水位较浅的情况下,氟化物和其他可溶性盐只随降水、地表水和蒸发向上或向下移动,

而不向外围排放。因此,水文地质条件是影响高氟地下水集中分布的主要控制因素^[41-42]。

研究表明,张家口地区地下水污染主要来自工业三废、生活污水、生活垃圾,以及农业生产用化肥、农药污染等,并且地下水主要污染组分以硫酸盐、硝酸盐和亚硝酸为主^[30,41]。截至20世纪90年代初,张宣盆地包括张家口市在内地下水被污染比较严重的地段还主要集中在市区及南郊部分地段,即在沿洋河分布从万全区至宣化区段,污染组分以硝酸为主^[30];而污染物进入地下水主要途径是通过污水流入河道中沿河床入渗或者通过渠道以及农田的包气带入渗进入地下水^[25]。此外,在社会经济和城市发展的历史进程中,工业废水、生活污水未经处理直接就近排放地表水体中,造成洋河地表水体的污染,渗入地下造成地下水污染现象相对严重;工业废渣、生活垃圾的污染物经雨水淋滤渗入地下,同样可以造成严重的地下水污染现象,例如原位于万全区东南的药厂(现已关闭)废污水、垃圾的排放造成了本区地下水污染,至今也能未消除^[43]。

如图8所示,张家口全区2015年工业废水排放量 58.63×10^6 t、生活污水 34.95×10^6 t、污水处理量 79.61×10^6 t、污水处理达标量 67.61×10^6 t,处理达标量占总污水排放量的72.25%。可以看出,近十年来张家口地区工业废水排放量平均为 51.72×10^6 t,而生活污水的产生量由 52.88×10^6 t减少到 34.95×10^6 t,这些废水绝大部分通过管道输送至污水处理厂,进行净化处理,处理之后的中水用于城市或城镇美化和浇灌;而工业废渣和生活垃圾运到无渗漏垃圾填埋场填埋,建筑垃圾堆放于附近山沟造地^[42-43]。总之,通过环境治理,无害化垃圾填埋以及污水处理,现在已基本阻断或削弱了对地下水污染的源头。但是张家口市城区地下水水质中硝酸盐、矿化度含量一直居高不下,可能是由于历史上对地下水污染的结果^[30,41]。

此外,近几年为了提高农村整体生活水平而大力发展蔬菜种植业和圈养畜牧业,生活垃圾及畜牧生活废污水的排放也成为地下水污染的途径,且地下水污染多呈点状或线状分布。而农业生产过程中造成的地下水污染,主要是由于大量的使用化肥、农药等,随着大气降水的入渗及灌溉回归入渗,大量的化肥及农药残留物渗入到地下含水岩组中,造成面状地下水污染。尤其是在农业生产活动频繁的坝上高原地区,地下水污染成分以NO₃⁻为主,其来源主要是人为来源

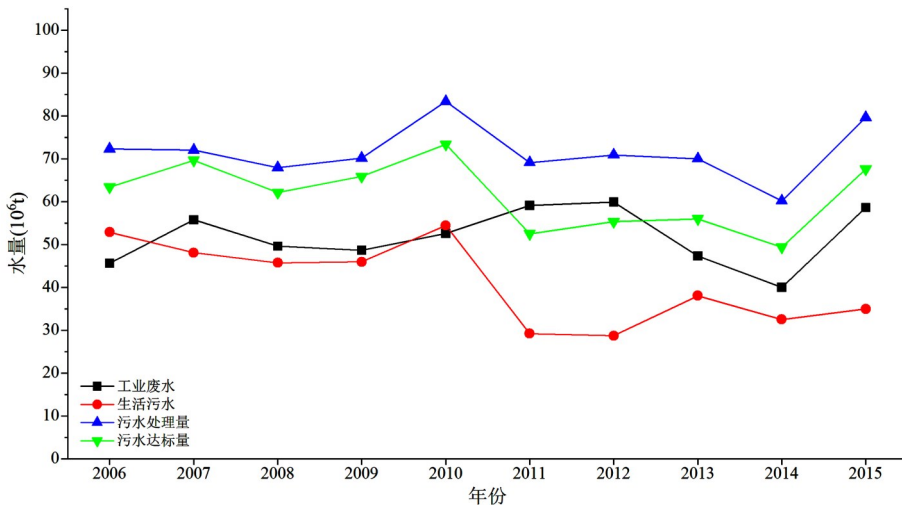
图8 张家口工业废水和生活污水排放及处理量统计^[43]

Fig.8 Industrial wastewater, domestic sewage discharge and treatment statistics

(化学肥料、农家肥、生活污水和生活垃圾)。农业区过量的使用农业肥料使 NO_3^- 在坝上农耕区片状分布;同时,城镇污水和生活垃圾是更重要的氮污染源,因此城镇化导致县城附近的 NO_3^- 浓度较高^[42-43]。

3.4 地下水开发利用保护建议

根据张家口地区地下水资源与环境质量的实际情况,提出地下水开发利用方案如下:(1)对于地下水资源开采量较大的地区,应适度进行调减,避免出现地下水过度开采现象,以达到控制因地下水水位下降导致的一系列生态地质或环境地质问题;(2)提高水资源的利用效率。在农业上推广实行管、喷、滴灌等先进灌溉技术和节水增产的灌溉制度;在工业上必须全面调整现有工业结构,严格控制高耗水工业的再发展;(3)尽快实现污水资源化,加大污水处理的投资,提高污水处理技术,使低水质用户自然转向使用经过净化处理的水,并且把它作为一种可靠的水源;(4)开展排污口关闭、垃圾处理工程、保护区内的污染企业及村寨搬迁、畜禽养殖控制工程等;(5)加强对灌溉污水的水质监测,对灌溉污水进行净化处理,合格后将净化后的水排入附近水体或回用,并且科学地规范使用农药、化肥,放弃Cd、Hg、Cu等重金属元素含量较高的高毒、高残留农药,改善地下水水质概况;(6)建立和健全地下水动态监测体系,对地下水水位、水量、水质进行系统观测;合理地设立监测站点对供水水源地进行长期不间断监测。

4 结论

通过资料搜集对张家口地区地下水资源开发利

用现状进行了较为系统的梳理,分析了地下水水化学特征,并采用单因子指数法进行水质评价,获得该地区地下水环境质量概况。

(1)近十年以来,随着工农业和城镇化的发展,地下水的开采量逐渐增加,地下水资源承担了张家口地区居民生活、城市公共、工农业发展的主要供水任务。

(2)由于地下水开采量的增加,张家口地区不同地貌单元及下辖各区县的地下水位呈整体下降趋势,并且下降速率逐步加快的时期主要为20世纪八九十年代和21世纪初期。

(3)坝上高原地下水质量总体一般,而坝下盆地地下水质量相对较好,其中劣质地下水超标组分主要为氟化物、总硬度、TDS和硝酸盐;其中水文地质条件是影响高氟地下水集中分布的主要控制因素,人类活动对地下水中硝酸盐含量的影响不容忽视。

(4)地下水主要污染组分以硫酸盐、硝酸盐和亚硝酸为主,其主要来源为工业三废、生活污水、生活垃圾,以及农业生产用化肥、农药污染等。由于自然环境的影响以及部分人环境保护意识不强,致使生产、生活污水无序排放,加上农业上农药、化肥无节制使用,部分地段出现地下水水质恶化现象。

参考文献:

- [1] ASLAM R A, SHRESTHA S, PANDEY V P. Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology[J]. Science of The Total Environment, 2018, 612:853-875.
- [2] TAYLOR R G, SCANLON B, PETRA DÖLL, et al. Groundwater and climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3 (4):322-329.
- [3] LIU J, RAVEN P H. China's Environmental Challenges and Implications for the World[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2010, 40(9-10):823-851.
- [4] PERNET-COUDRIER B, Qi X W, LIU H J, et al. Sources and Pathways of Nutrients in the Semi-Arid Region of Beijing-Tianjin, China[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(10):5294-5301.
- [5] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P, GESSNER M, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, 467(7315):555-561.

- [6] YU C. China's water crisis needs more than words[J]. *Nature*, 2011, 470:307.
- [7] WANG S, YANG F L, XU L, et al. Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53:158–166.
- [8] YANG J, LEI K, KHU S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China[J]. *Water resources management*, 2015, 29:885–899.
- [9] 陈彭, 马震, 王威, 等. 滦河三角洲地下水污染调查评价[J]. *地质调查与研究*, 2014, 2(37):115–122.
- [10] ZHAO X, LIU J, LIU Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112:1031–1035.
- [11] CHEN H, TENG Y, LU S, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 512:143–153.
- [12] MIN L L, SHEN Y J, PEI H W, et al. Water movement and solute transport in deep vadose zone under four irrigated agricultural land-use types in the North China Plain[J]. *Journal of Hydrology* 2018, 559: 510–522.
- [13] 杨齐青, 马震, 孙晓明, 等. 华北主要城市地下水应急水源供水前景分析[J]. *地质调查与研究*, 2009, (4):297–305.
- [14] ZHENG C, LIU J, CAO G, et al. Can China Cope with Its Water Crisis?—Perspectives from the North China Plain[J]. *Ground Water*, 2010, 48(3):350–354.
- [15] YUAN Z, SHEN Y. Estimation of Agricultural Water Consumption from Meteorological and Yield Data: A Case Study of Hebei, North China[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(3).
- [16] XIAO D, SHEN Y, QI Y, et al. Impact of alternative cropping systems on groundwater use and grain yields in the North China Plain Region[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153:109–117.
- [17] DAI D, SUN M, XU X, et al. Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: a case study in Zhangjiakou City, North China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 11000–11011.
- [18] 王强, 康慕谊, 邢开雄. 基于水资源约束的张家口坝上生态经济发展研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*: 2011(06):72–78.
- [19] 刘娟, 魏东玲, 王宇红, 等. 基于水资源合理利用的蔬菜产业结构调整研究[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*: 2014, (02):51–55.
- [20] JIANG B, WONG C P, LU F, et al. Drivers of drying on the Yongding River in Beijing[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519:69–79.
- [21] SONG C, YAN J J, SHA J H, et al. Dynamic modeling application for simulating optimal policies on water conservation in Zhangjiakou City, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201: 111–122.
- [22] LIU C, XU Y, SUN P, et al. Land use change and its driving forces toward mutual conversion in Zhangjiakou City, a farming–pastoral ecotone in Northern China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2017, 189(10):505.
- [23] SUN P L, XU Y Q, YU Z L, et al. Scenario simulation and landscape pattern dynamic changes of land use in the Poverty Belt around Beijing and Tianjin: a case study of Zhangjiakou city, Hebei Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*. 2016, 26(3):272–296.
- [24] 李红艳, 张笑天. 张家口市山区地下水氟化物含量现状分析[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2012, 30(3):31–33.
- [25] 张振莲. 张家口市地下水水质类型分析[C]. *地下水开发利用与污染防治技术专刊*, 2009.
- [26] 张玉海, 逯凤岐, 杨世贵, 等. 张家口冲—洪积扇区硝酸盐污染途径及形成机理分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 199, 4(4):96–99.
- [27] 河北省水利厅. 河北省水资源公报(2009–2021)[R]. 河北省水利厅.
- [28] 李金娜, 石素兰, 赵晓英, 等. 张家口坝上地区地下水补给平衡的策略研究[J]. *张家口职业技术学院学报*, 2017, 30(04):31–33.
- [29] 张晓烨, 方彦舒. 张家口市地下水超采现状及综合治理[J]. *河北水利*, 2018, 286(12):38–39.
- [30] 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(06):43–55.
- [31] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global Consequences of Land Use[J]. *Science*, 2005, 309(5734):570–574.
- [32] WADA Y, BEEK L P H V, BIERKENS M F P. Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(6).
- [33] WADA Y, WISSER D, EISNER S, et al. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(17): 4626–4632.
- [34] BÖHLKE J K. Groundwater recharge and agricultural contamination[J]. *Hydrogeology Journal*. 2002, 10 (1): 153–179.
- [35] SCANLON B R, GATES J B, REEDY R C, et al. Effects of irrigated agroecosystems: 2. Quality of soil water and groundwater in the southern High Plains, Texas[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): 1–14.
- [36] RUSSO D, LAUFER A, GERSTL Z, et al. On the mechanism of field-scale solute transport: Insights from numerical simulations and field observations[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50 (9): 7484–7504.
- [37] 李改梅, 张国新. 张家口市饮用水水源保护区现状及保

- 护对策[J].地下水,2015,37(6):91-92.
- [38] 王彦芳,裴宏伟.1980—2015年河北坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J].生态经济,2018,34(1):186-190.
- [39] 苏伟杰.张家口内陆平原区地下水资源及其特征[J].安徽农业科学,2017,45(13):44-45.
- [40] 李予红,宋晓光,胡斌,等.张家口坝上地区高氟地下水分布与成因分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,1-11.
- [41] JIANG W J, SHENG Y Z, LIU H W, et al. Groundwater quality assessment and hydrogeochemical processes in typical watersheds in Zhangjiakou region, northern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021.
- [42] 韩双宝,李甫成,马涛,等.燕山-太行山连片扶贫区 1/5 万水文地质调查二级项目成果报告[R].中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,2019.
- [43] 耿昕,刘伟朋,任政委,等.京津唐张交通廊道规划建设区 1/5 万环境地质调查二级项目成果报告[R].中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,2019.

Research on exploitation, utilization and environmental quality of groundwater in Zhangjiakou area and suggestions on its utilization and protection

JIANG Wan-jun^{1,2}, MENG Li-shan^{1,2}, LIU Fu-tian^{1,2},
LIU Hong-wei^{1,2*}, ZHANG Jing^{1,2}, NING Hang^{1,2}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey (CGS): Tianjin 300170, China;

2. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China)

Abstract: Understanding resources and environment quality of groundwater is of great significance for sustainable utilization of groundwater in arid or semi-arid regions. In this study, the development and utilization of groundwater resources in Zhangjiakou area were systematically summarized by collecting data. Additionally, 177 groups of groundwater samples were collected for analysis of hydrochemical characteristics, and 22 indicators were selected for water quality evaluation according to the Groundwater Quality Standard (GB / T14848-2017) to reveal the general situation of groundwater environmental quality. The results showed that the average annual amount of water supply by groundwater was 192 million m³, accounting for 78.69% of the total water supply. In the past ten years, groundwater resources have been the main water supply task for people's life and the development of industry or agriculture, leading to the continuous decline of groundwater level in many regions. Only 44.44% of the samples in Bashang Plateau could satisfy the class III water quality standards, and the main substances exceeding the standard are fluoride, total hardness and TDS. On the contrary, the groundwater quality of Baxia basins was generally good, with 70.73% of the samples meeting the Class III water quality standards. Hydrogeological conditions were the main controlling factors affecting the distribution of high-fluoride groundwater, and the influence of nitrate input from human activities on the chemical composition of groundwater cannot be ignored. This paper provided a scientific basis for the prevention and control of groundwater pollution, and the protection and optimal allocation of groundwater resources in Zhangjiakou region.

Key words: groundwater resources; groundwater environment; scientific evidence; Zhangjiakou region