

石家庄地区近 70 年来伴随经济发展的 水文环境变化分析

沈彦俊¹, 宋献方^{2*}, 肖捷颖³, 陈建耀⁴, 唐常源^{5,2}

(1.中国科学院 遗传与发育生物学研究所农业资源中心, 石家庄 050021; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3.日本千叶大学 环境遥感研究中心, 日本 千叶 263-8522; 4.中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510275; 5.日本千叶大学 园艺学部, 日本 千叶 263-8522)

摘要: 论文系统分析了石家庄地区 70 年来伴随社会经济的水资源开发历史, 结合水文资料探讨了人类活动对区域水文环境变迁的影响。并通过对地下水采样, 结合室内水化学和氡同位素测定, 确认区域地下水补给来源主要是通过河道得到线状的垂向补给, 和上游含水层的侧向补给两种天然途径。城市及工农业发展改变了区域水循环系统的补排结构。河流断流减少了地下水的垂向补给, 造成地下水的补给源从原来的天然垂向补给和上游的侧向补给, 变为单一的侧向补给。另一方面, 大量开采地下水已成为区域地下水排泄的主要方式。其中用于农业灌溉的大部分以蒸发、蒸腾的形式耗散于大气, 无法回补。地下水位的持续下降、地下水化学类型转变及其空间分布显示了水量和水质以及生态环境的变化。

关键词: 社会经济发展; 水文环境变化; 水资源开发利用; 区域水循环结构; 水化学

中图分类号: P331.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3037(2007)01-0051-11

1 引言

随着全球变化研究的深入, 人类活动对水文环境的影响和冲击越来越受到科学家的重视。区域的水文循环和变化已成为广泛关注的重点问题, 许多重大的国际研究计划多与此有关, 如 GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystem), BAHQ (Biospheric Aspects of Hydrological Cycle) 等。上世纪 90 年代以来, 水文循环系统对全球气候变化的响应成为水文学研究的一个热点, 已有很多相关研究^[1-6]。但随着研究的深入, 人们越来越认识到人类活动在影响和改变水文循环与水文环境方面的作用远远超过气候变化的影响。2005 年开始的全球水系统研究项目 (Global Water System Project, GWSP) 将水文循环中的人类因素和人与水文系统的相互关系作为核心内容。城市扩展与工农业发展对区域水资源等进行人为的重新分配使用, 从而使这些地区成为陆地表层水系统中最为敏感的区域之一。城市和工农业用水的发展不仅是区域水资源研究的重点, 而且在全球水分循环与水资源评估方面占有重要的位置^[7]。

收稿日期 2006-02-15; 修订日期 2006-07-20。

基金项目: 日本文部科学省基础科研课题 (No. 16651004); 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程自然科学基金延伸支持领域前沿项目“华北山区典型流域水循环机理试验研究”(CX10G-A04-11); 中国科学院创新工程项目 (KXCX-SW-428) 资助。

第一作者简介: 沈彦俊 (1971-), 男, 河北康保人, 博士, 研究员。主要从事陆面生态水文过程、遥感的水文学应用、人类活动与水文环境变化以及水资源模拟方面的研究。E-mail: yj.shen@gmail.com

* 通讯作者简介: 宋献方 (1965-), 男, 河北沙河人, 博士, 研究员、博士生导师。主要从事流域水循环与环境、环境同位素水文学、水文地质等研究。E-mail: songxf@gsnrr.ac.cn

因此,研究区域水循环的演变规律,分析区域水资源开发利用变化的时空分异特征、规律以及对环境的影响,能为区域水循环结构改变对区域经济发展的影响研究提供科学依据。本文以石家庄市过去70年的发展为例,探讨伴随着社会经济变化的区域水文环境变化规律。

2 研究区概况

研究区域以石家庄市为主,包括正定和栾城县,位于 $114.0^{\circ}\sim 114.25^{\circ}\text{E}$, $37.75^{\circ}\sim 38.50^{\circ}\text{N}$ 之间(图1)。石家庄市在20世纪初仅是一个很普通的小村庄,人口从不足600余人增加到1950年的 28.7×10^4 人,到20世纪末(1999年)已增加到 160.9×10^4 人^[9]。1950年代之前人口

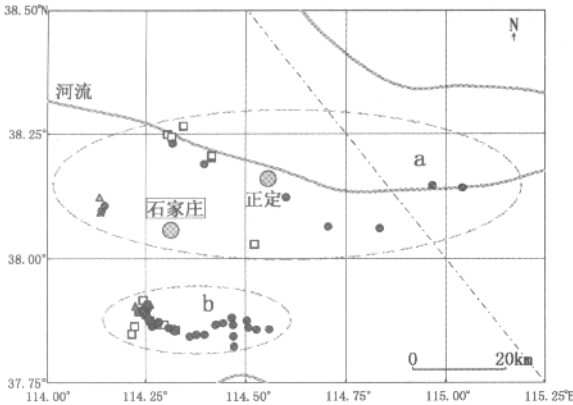


图1 研究区域和水质、同位素样品采样地点分布
Fig.1 The map of study area and water sampling locations

规模小,增长缓慢,50年代之后随着社会稳定和经济的发展,城市人口增长迅速。

区内多年气温 13°C ,为温带半干旱半湿润大陆性季风气候。多年平均降水量 493mm ,最大 1182.7mm ,最小 226.1mm 。多年平均可能蒸发量为 1972mm 。由于该区受到基岩地质构造控制,第四系沉积物由西北向东南逐渐增厚,按沉积次序及岩性共划分为滹沱河冲、洪积扇(图1区域a)与北沙河洪积扇(图1区域b)两个区。

研究区地处太行山中段与河北平原的结合部,属于华北地块的太行山隆起与河北平原凹陷的过渡带,是太行山山前滹沱河洪冲积平原的一部分,由滹沱河的洪积、冲积扇构成。市域范围内地貌类型以平原为主,且呈自西北向东南倾斜的趋势,地势平坦,海拔在 $150\sim 45\text{m}$ 之间,地面平均坡降为 1.5% 左右。滹沱河洪冲积扇区可分为4个含水层组。北沙河洪积扇区位于研究区西南部,该洪积扇含水层组底板埋深 $40\sim 80\text{m}$,含水层厚 $22\sim 24\text{m}$ 。岩性以中粗砂及砂砾石为主。

3 资料与研究方法

本研究通过对研究区过去70年的水文地质资料、社会经济文献和城市地图等进行综合整理,并通过现场调查,对地下水采样,分析水质组成和氡同位素浓度,研究城市和农业发展与水资源开发等人类活动对区域水资源系统和水循环结构的影响。

通过GIS方法对1934年至2001年间5幅地图进行空间分析,得出石家庄市70年来的城市化过程,研究结果已另文发表^[9],本文直接利用结果。城市用水、农业生产及灌溉情况的资料来自石家庄市经济统计年鉴和石家庄志以及石家庄供水总公司。气象资料来自河北省气象台站。

为了查清研究区域地下水水循环特征,从2000年至2001年根据不同季节对地下水进行了4次实地调查和采样。现场观测的项目包括地下水位、水温、电导率、pH值等。地下水的氡同位素浓度则通过液体闪烁仪来分析。同时,通过用户访问了解实际地下水利用的情况。此外,研究区的地下水位和水质的历史资料通过查阅有关文献来收集。并利用环境统计资料

展现当前水环境的污染状况及其变化,分析石家庄地区土地利用/覆盖变化对区域水文环境的影响及其反馈作用,探讨两者之间的相互关系。

4 区域地下水位及其水质变化特征

4.1 城市化进程和水资源开发利用

图 2 显示了从 1934 年到 2001 年石家庄市市区面积扩展和地下水位埋深的变化状况。根据肖捷颖等人的研究结果^[8],过去近 70 多年来,石家庄市的城市化发展可以归纳为缓慢成长期、快速恢复期、迂回增长期和高速增长期 4 个发展阶段^[9]。在这 4 个阶段中水资源开发也有其不同的特点。

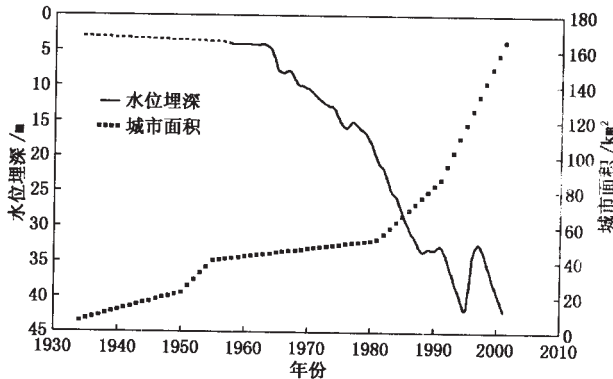


图 2 石家庄市市区面积扩展和地下水位埋深的变化

Fig.2 The change of groundwater depth and developed area of Shijiazhuang

(1) 缓慢成长时期(1934—1950年)

石家庄市因其地理位置优越,在京汉和正太铁路相继建成后,而发展成为华北物资运输的集散地且日趋繁华,城市类型为小型商业城市和消费城市。城市用水主要为地表水和地下水。到 1950 年,石家庄市的供水机井只有 2 眼,年供水量 $39 \times 10^4 \text{m}^3$,主要用于生活用水,地下水埋深在 3~5m 左右^[9]。

(2) 国民经济快速恢复时期(1950—1955年)

这一阶段石家庄市城市用地发展很快,新中国的建设初期,百业待兴,一些国家重点工程项目相继落户石家庄,如纺织联合企业、华北制药厂及热电厂。仅这 5 年内城市基本建设就占用耕地约 2000hm^2 。这个时期是石家庄市城市用地的第一个高速扩展时期,除了利用地表水外,地下水的埋深大约下降了 1m 左右。这个时期滹沱河常年流水,地表水资源丰厚,地下水开采量仍很小,地下水机井只有 5 眼,年供水量为 $170 \times 10^4 \text{m}^3$,基本处于补排平衡。

(3) 迂回增长时期(1955—1981年)

在这一时期中国经历了大跃进、三年自然灾害和调整时期以及文化大革命。尽管石家庄市的城市用地扩展非常缓慢,但城市化和工业生产的发展加快了地下水的开采,地下水位下降速度为 0.65m/a 。从水资源开发角度来看,在这段时期内上游水库的建造,以及华北平原防洪排涝基本建设的完成,形成了水资源人为调控的基本格局。1965 年以前,石家庄市的地下水还处在天然状态,随着水利工程的建成,上游水库的拦蓄,河道流量的减少,而使地下水的补给量逐渐减少,同时随开采量的逐年增加,从 1965 年开始出现地下水漏斗,地下水位逐年下降。在 1973 年出现封闭等水位线,面积为 1.0km^2 ,地下漏斗中心水位埋深为 15.74m 。据统

计,1973年的机井达到44眼,此后每年都有新的机井投入生产,并陆续有机井因地下水位的下降而报废。到1980年机井数达到77眼,累计报废的机井有9眼。1970年代以来工业用水增长显著(图3),占到总用水量的32%,而生活用水达到总开采量的55%。

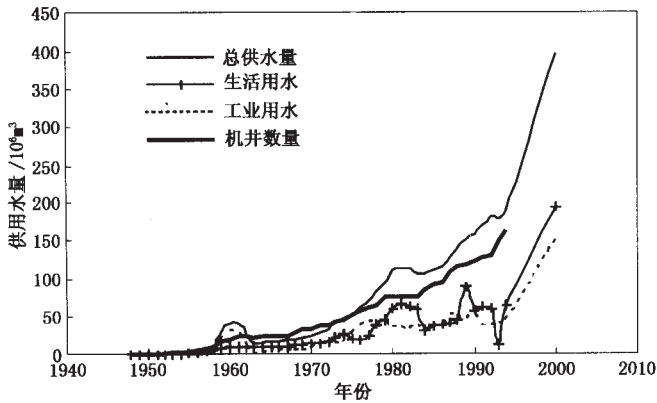


图3 近50年来石家庄市城市用水情况变化

Fig.3 Yearly change of water use structure of Shijiazhuang in the recent 50 years

(4)高速增长时期(1981—2001年)

在这一时期,石家庄市城市化出现前所未有的快速发展趋势。除了旧城改造以外,更多的是向外扩张,如1995年石家庄城市建设占用耕地126.67hm²。这一时期流经石家庄的几条河流陆续断流,河道干涸,只在汛期过水。城市用水水源主要以地下水为主,到1994年投产的地下水井已猛增到164眼,地下水年开采量达到1.89×10⁸m³。地下水位下降迅速,地下水漏斗中心水位埋深从1985年的31.32m下降到1995年的43.47m,年平均下降速度为1.1m/a。随着浅层地下水资源的锐减,1990年代后期,石家庄市建设引水入市工程,开始将黄壁庄水库的蓄水用于生活用途,并开始开采深层地下水。2000年的统计资料显示,市区总供水量达到3.97×10⁸m³,其中地表水和深层地下水各占14.4%和3.1%。

4.2 农业发展和水资源开发利用

农业生产和灌溉的发展是导致区域地下水位下降的另一个主要原因。在石家庄城市形成发展之后,郊区为农田生态系统,种植冬小麦、玉米、大豆及棉花、蔬菜、梨果等经济作物。作物生长主要依靠地下水灌溉。图4显示了栾城县建国以来全县平均粮食单产和机井数量的变化关系。

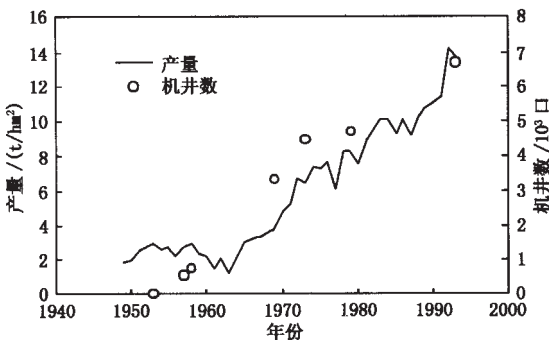


图4 栾城县建国以来粮食单产与机井数量的变化

Fig.4 The changes of grain production and well number in Luancheng during the last 50 years

的变化关系。尽管粮食单产的增长受很多因素的影响,如施肥、栽培技术等^[10],但从图4可以明显看出,全县尺度的粮食增产在很大程度上决定于机井数量的增加,即耕地灌溉率的提高。

图5显示了栾城县地下水灌区和污水灌区地下水位多年变化的对比。在以地下水进行农业灌溉的地区,该区浅层地下水位与多年的气候变化及灌溉密切相关。地下水位年内变化特点是3—6月份,受冬小麦各生育期阶段的灌水影响,地下水

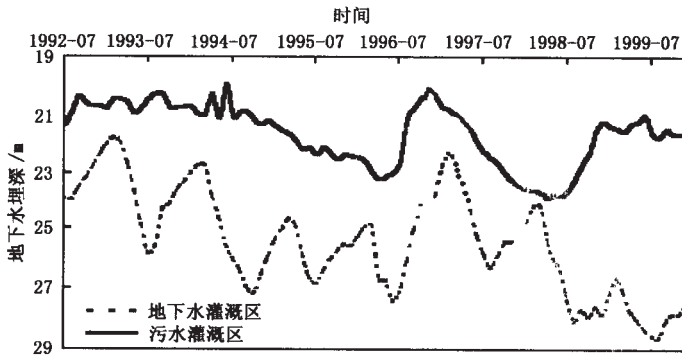


图 5 地下水灌溉区和污水灌溉区的地下水埋深变化

Fig.5 The comparison of groundwater depth changes at groundwater irrigated area and sewage irrigated area

得不到及时补给,水位持续下降,最低水位出现在 5 月底到 6 月初(图 5)。7 月份进入雨季,地下水开采量减少,加上受太行山前侧向径流的补给,地下水又开始缓慢回升,并持续到来年的 1、2 月份,年内水位达到峰值。尽管受冬灌的影响,地下水水位在 11 月份下旬会出现暂时的下降,总的趋势仍是回升。由于长期以来地下水的开采大于补给,2 月份的地下水水位峰值往往比上一年要低,地下水呈波动下降的变化趋势。大量抽取地下水已经成为区域地下水排泄的一个重要组成部分。而大部分的灌溉用水以蒸发、蒸腾的形式消散于大气,无法回补地下水,从而造成区域地下水位的持续下降。

此外,石家庄市的污水通过东明渠输送到污水灌溉区。污水灌溉农田主要分布在渠道两侧 1~2km 以内。和 1992 年 7 月相比较,1999 年 7 月地下水位在地下水灌溉区和污灌区分别下降了 5m 和 0.5m(图 5)。由此可见,地下水灌溉区的地下水水位变化特征显示地下水没有得到充分的补给,而污灌区的地下水水位变化不大,则表明地下水补排基本达到了平衡。就目前的灌溉定额来说,和地下水灌溉区相比较,污水灌溉确实对地下水进行了有效的补给,并使灌溉区的地下水基本处于补排平衡状态,但是也引起了地下水的污染。

4.3 区域地下水质的变化

石家庄市的环境状况在 1950 年代以前由于城市规模小,仅有少量的工业发展(多为纺织、运输、煤炭等),城镇用地比例小,地下水的水质良好,地下水矿化度小于 0.5g/l,北部、西北部在 0.3~0.4g/l 之间。根据张宗祜等^[10]的工作,1959 年的资料显示地下水中的 TDS 为 340mg/l, NO₃ 为 2.35mg/l, pH 值为 7.69,此时的水化学环境基本上可代表研究区域本底情况。

随着城市发展,疏干性开采改变了地下水的化学场分布,加之城市经济活动的影响,促进了地下水化学特征的变化。到 2000 年,地下水的矿化度达到了 0.58g/l,西北部也在 0.75g/l 左右。氯离子浓度的变化也十分明显(图 6)。石家庄市在 1960 年代只有在东明渠两侧存在部分重碳酸氯化物型水,而现在石家庄市南半部分基本上为重碳酸氯化物型水,分布面积较原来增加近一倍。

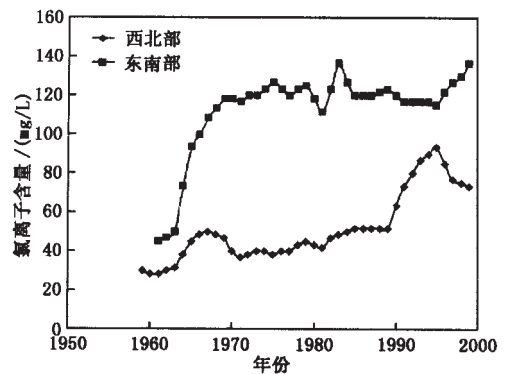


图 6 石家庄市地下水中氯离子含量的变化

Fig.6 The change of Cl⁻ concentration in groundwater in Shijiazhuang

统计资料表明,石家庄市地下水水质从1988年到1994年间所监测的污染物指标含量大部分有上升趋势,尤其亚硝酸盐氮含量从1988年的平均0.003mg/l上升到1994年的0.024mg/l,增长了8倍。只有总氰化物略有下降,从1988年的平均0.004mg/l降到1994年的0.002mg/l,水质状况不容乐观。

5 区域水循环结构的变迁

区域的水文循环结构很大程度上受地质地貌和气候条件如降水的影响,特别是在半干旱半湿润地区。然而,剧烈的人类活动正在以更大的强度改变着整个水资源系统和水循环的结构。前述可知,由于城市和工农业生产的发展以及水利工程建设,研究区内的河川完全断流,平原区的地表水资源几乎枯竭,地下水资源也在超强度的开采下急速减少。另外,河流的干涸使得平原地区地下水失去了一个主要的补给源,从而加速了水位的下降。下面将分述几个主要水循环要素的变迁,从中讨论人类活动对区域水资源补排状态的影响。

5.1 降水与蒸发

降水是受气候变动影响较大的一个因子,由于气候的自然振荡和人类活动所带来的全球增暖的影响,华北地区在1965年前后发生了一次较大的气候变化之后,年降水量连续减少^[13]。分析石家庄市近30年来的降水序列资料发现,1971—1980年年平均降水为481.2mm,

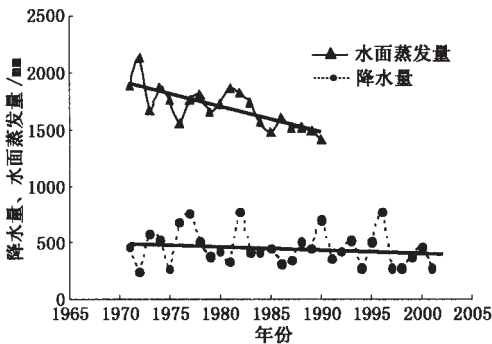


图7 研究区的多年降水量和水面蒸发量变化趋势(栾城)

Fig. 7 The trends of annual precipitation (dots) and reference evaporation (triangle)

1981—1990年为468.7mm,1991—2001年降为407.2mm,呈现了逐渐减少的趋势(图7)。尽管许多研究都曾指出我国北方地区气候存在30~40年的旱涝周期^[14-16],但是在近几十年来史无前例的人类活动影响下,气候系统的内在节律很有可能被破坏,因此很难预测未来10~20年气候的变化趋势^[13]。

根据栾城的多年实际蒸(散)发实验分析,研究区农田的实际年蒸发量约为800mm,每年超过300mm需要靠开采地下水来补充。而这一地区地下水的年灌溉回补量小于100mm^[17],长期的采补失衡造成了地下水位的持续下降。水面蒸发是反映大气蒸发能力的一个综合指

标,受太阳辐射、气温、风速、相对湿度等因子的影响。在降水普遍下降的同时,水面蒸发量也显示出明显的下降趋势(图7)。徐富安等^[18]曾分析了封丘地区50年的气象记录,认为水面蒸发的下降与区域性的防护林网建设(消减风速)和大气尘埃及气溶胶的增加(到达地表的太阳辐射减少)关系密切。另外,美国能源部和中国气象局的合作研究也显示1954—1998年间华北地区的日照和云量呈明显的下降趋势,而最高和最低气温却呈现显著的上升趋势^[19]。此外,灌溉面积和强度的增加导致近地层大气湿度增加对于水面蒸发的减少也有一定的贡献。Yang等^[20]最近利用傅抱璞模型对全国不同气候区域的水面蒸发资料进行分析,获得了很有意义的结果。因此有必要对人类活动引起的区域土地利用/覆盖变化、水文循环系统的改变和区域气候要素的耦合关系进行深入研究。

5.2 地表水

地表水和地下水之间的相互联系是理解半干旱半湿润地区水资源补排状态的一个关

键。研究区的地表水主要是河流,石家庄市市区内部无大的河流通过,滹沱河在市郊北部及正定县流过,后汇入子牙河水系,属海河流域,但因上游黄壁庄水库的建成以及工农业生产、生活用水需求的增加,滹沱河中下游自 1970 年代后期开始干涸,仅有少数年份在汛期过水。此外,洨河源于获鹿,穿过栾城,是石家庄市的一条排污河,对区内地表水、地下水均有很大程度的影响。

1956—1984 年间石家庄市、正定县和栾城县的年径流深均值分别为 64.5、41.4 和 32.3mm。而近年来,由于降水的减少和地下水位的下降,研究区的自产径流普遍减小,只有城市部分由于硬化地面的扩大而有所增加。Shen 等的分析表明,石家庄市的城市化引起的土地利用/覆盖变化改变了城市范围的水量平衡,由于地面入渗能力的降低,地面产流效率提高,相对于 1987 年,2001 年的城市化地面增加 27.4%,在年降水量下降 7.4%的情况下,产流量由于土地利用的变化而增加 17.9%^[22]。因此,在集中降雨的情况下发生城市型洪水的风险增大。另外,前文提到的城市排污成为研究区内仅有的地表径流,而在污水灌溉的地区,通过灌溉入渗对地下水有一定的补给作用。

5.3 地下水

在区域水循环系统的研究中,氙是利用最早、最广泛的同位素,其半衰期为 12.43 年。自然产生的氙主要以 HTO 形式在自然界循环,其浓度通常大约为 10TU。受上世纪 50 年代前期到 60 年代中期核试验的影响,降水中氙的浓度急剧增长,并在 1963 年达到峰值,是氙天然浓度的 100~1 000 倍。随着大气层中核实验的禁止,降水的氙浓度逐渐变小,到 90 年代基本恢复到了自然状态^[23]。

地下水的氙来源于大气降水或地表水的补给,其浓度变化与补给来源密切相关,在同一地下水系统,氙浓度一般随水在含水层中的滞留时间而减少。据氙衰变的这一特点,可以计算含水层中地下水的年龄^[23]。利用这一理论,可以判断地下水的补给来源、地下水体与其他水体之间的关系,从而了解并掌握地下水运动速度、水循环过程和水文地质特征。

石家庄市的地下水资源主要赋存于东部山前平原,主要含水层分布在第四纪冲积洪积层中,以滹沱河现代河床及滹沱河洪冲积扇的轴部为极富水区,主要补给方式有:通过大气降水入渗补给,滹沱河河槽地带入渗条件较好;通过河渠渗漏补给,石津渠、东明渠等大小干渠入渗补给;通过农田灌溉回渗补给,农田多存在于城区地下漏斗的外围,市区西北部依地势(西北高东南地)进行补给,而东南侧则存在反向补给的情况。

图 8 显示了石家庄附近滹沱河流域地下水氙同位素浓度变化。可以看出滹沱河两岸的地下水的氙同位素浓度在 11~28TU 之间变化,沿程没有明显的变化。从水的年龄来看,基本在 30~40 年之间。由此可以看出两个事实:第一,地下水的年龄相差不大,说明滹沱河沿线的地下水主要接受了垂向补给;第二,地下水的年龄都在 30 年以上,说明在过去 30 年中,河水补给地下水的方式受到了很大的限制。也就是说,除了洪水季节以外,研究区域的地下水没有得到河水的有效补给,成为地下水持续下降的主要原因之一。

图 9 是石家庄附近北沙河河流域地下水中氙同位素浓度从上游到下游的变化。北沙河是山区小河流,流向由西向东,到东经 114.32°后消失。而洨河在东经 114.45°~114.5°之间从北向南横穿北沙河河流域。从图 9 可知,北沙河河流域的地下水的氙同位素浓度有两个峰值。东经 114.45°~114.5°之间的区域为污灌区,地下水得到垂向的补给。和仅仅利用地下水进行灌溉的区域相比较,地下水的氙同位素浓度峰值说明过去 20~40 年的污灌在区域地下水的补给

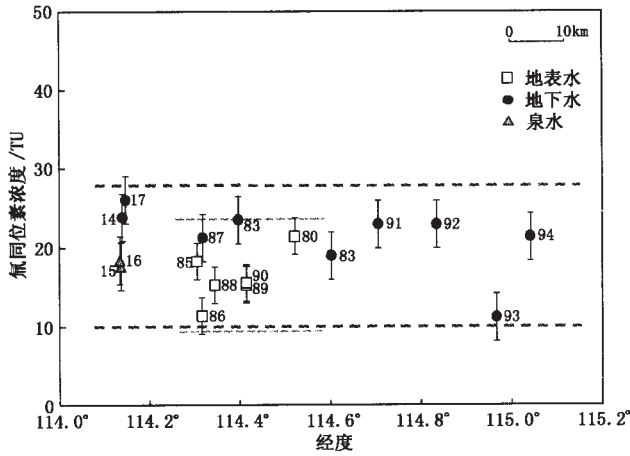


图 8 滹沱河两岸地下水中氚同位素浓度的沿程变化(图 1 区域 a)

Fig. 8 Tritium distribution along Hutuo River (region a in Fig. 1)

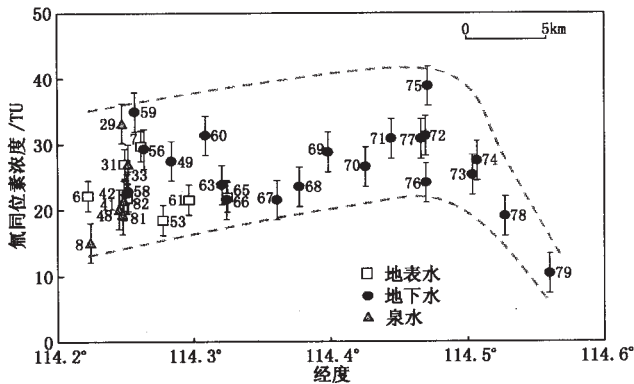


图 9 北沙河流域氚同位素浓度变化(图 1 区域 b)

Fig. 9 Tritium distribution in Beisha river basin (region b in Fig. 1)

上起到了很大的作用。这和 Tang 等的研究结果是一致的^[12]。如果将污灌区去掉的话,从整体来说,北沙河流域从上游到下游地下水的氚同位素浓度逐渐减少,尤其在 114.5 以后的下游地区,氚同位素浓度迅速下降。由此可以推测,北沙河流域的地下水除了上游地区以外,主要接受侧向补给,垂向补给较少。由于补给方式不一样,补给量和补给时间也各有不同。在研究区域中,得到垂向补给的水的年龄往往比侧向补给的新。经推算,北沙河流域上游地区地下水的平均滞留时间大约为 50 年左右;而远离太行山的滹沱河沿河区域地下水的年龄也大约在 30~40 年左右。

由此而知,半干旱半湿润区冲积扇的河流是地下水的重要补给源。重碳酸、硫酸钙(钙镁)型水沿滹沱河、石津灌渠呈带状分布,也充分说明了地表水对区域水资源补给的天然特征。在自然条件下,冲积扇的规模、河流的大小、流向、流量及其气候带的影响,都决定了流域水循环结构,尤其是地下水补给的特点。

另一方面,自然条件下地下水排泄主要由含水层的地下水力坡度来决定。平原的地下水力坡度一般较小,地下水的流动也比较缓慢。1970 年代中期以后,随着区域水资源人为调控

局面的形成和经济发展,大量抽取地下水已经成为区域地下水排泄的一个重要组成部分。由此,区域的水资源开发利用不仅改变了水的时空分布,同时还改变了区域尺度的水循环结构。目前华北平原河流的断流产生的一系列生态环境问题,和过去几十年来人类活动形成的新的水循环结构是息息相关的。

6 结论

通过以上的讨论可以得出如下结论:

(1)过去半个多世纪研究区域的社会和经济发展从水资源开发利用角度,可以总结为 4 个阶段:缓慢成长期(地下水基本处于自然状态)、快速发展期(地表水资源丰厚,地下水开采量小,基本处于补排平衡)、迂回增长期(华北平原防洪排涝基本建设完成,基本形成了水资源人为调控的格局)和高速增长期(地下水位迅速下降,地下水漏斗面积增加)。

(2)研究区域的水资源开发利用强度在过去 40 多年中特别显著,对工农业和城市发展起了很大的作用。同时,地下水的过量开采,造成区域地下水位的下降和出现地下水漏斗现象。除了污灌区以外,持续多年的地下水位下降也说明了区域地下水资源所处的入不敷出状况。

(3)人类活动通过改变地下水的水动力场和地球化学场来影响水中的物质迁移、转化和积累。地下水化学类型及其空间分布的改变预示了研究区域不仅存在水量型缺水,同时也将出现水质型缺水的问题。因此,由于区域水循环结构的变化,对水质以及生态环境所产生的影响将是亟待解决的严峻课题之一。

(4)城市化、工业化和农业现代化使区域的水循环结构发生了很大的改变。最突出的是区域地下水补排结构的改变。河流断流减少了对地下水的垂向补给,造成研究区域地下水的补给源从原来的天然垂向补给和上游的侧向补给,变为单纯的侧向补给。另一方面,大量抽取地下水已经成为区域地下水排泄的一个重要方式。其中用于农业灌溉的很大一部分以蒸发、蒸腾的形式离开研究区域。从水平衡角度来看,灌溉用水并没有成为地下水的有效补给源,从而造成区域地下水位的持续下降。

(5)区域水循环对于人类活动的强度的响应往往是滞后的。其滞后程度和水循环速度有密切的关系。这种响应不应单纯认为是个水量或水质问题,它反映了区域水循环结构内部所发生的一系列从量变到质变的过程。因此,为了水资源的可持续开发利用,必须加强对区域水循环的基本机理以及结构的研究。

参考文献(References):

- [1] Legesse D,Vallet-Coulomb C,Gasse F.Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa:case study of South Central Ethiopia[J].Journal of Hydrology,2003,275(1-2): 67- 85.
- [2] Mwakalila S.Estimation of stream flows of ungauged catchments for river basin management[J].Physics and Chemistry of the Earth(Parts A/B/C),2003,28(20-27):935- 942.
- [3] Panagoulia D,Dimou G.Linkage space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change:Part 2. Hydrological response for alternative climates[J].Journal of Hydrology,1997,194(1-4): 38- 63.
- [4] Singh P,Kumar N.Impact assessment of climate change on the hydrological response of a snow and glacier melt runoff dominated Himalayan river[J].Journal of Hydrology,1997,193(1-4):316- 350.
- [5] Sefton C E M,Boorman D B.A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows[J].Journal of Hydrology, 1997,195(1-4):26- 44.
- [6] Parkin G,O'Donnell G,Ewen J,et al.Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts:2. Case study for a Mediterranean catchment[J].Journal of Hydrology,1999,175(1-4): 595- 613.

- [7] Oki T,Agata Y,Kanae S,et al.Global water resources assessment under climatic change in 2050 using TRIP[A].In:Franks S,Blöschl G,Kumagai M,et al.Water Resources Systems- Water Availability and Global Change [C].IAHS Publ.No.280,2003.124- 133.
- [8] 肖捷颖,葛京凤,沈彦俊,等.基于GIS的石家庄市城市扩展分析[J].地理研究,2003,22:789-798.[XIAO Jie-ying,GE Jing-feng,SHEN Yan-jun,et al.GIS-based analysis on urban expansion in Shijiazhuang,China.Geographical Research,2003,22:789- 798.]
- [9] 中国農村慣行調査刊行会.中国農村慣行調査(第六卷)[M].東京:岩波書店,1958.400. [Publication Committee on Chinese Rural Custom Investigation.Chinese Rural Custom Investigation (Vol. 6).Tokyo:Iwanami Bookshop,1958.400.]
- [10] 金子紫延.华北平原における水文地質環境と食糧生産の関連性についての研究[D].千葉大学大学院修士論文,2003.41.[Kaneko Shinobu.Study on the Inter-relationship Between Hydro-geological Environments and Food Production in North China Plain.Master Thesis.Chiba University,2003.41.]
- [11] 张宗祜,等.华北平原地下水环境演化[M].北京:地质出版社,2000.[ZHANG Zong-hu.The Evolution of Groundwater Environment in North China Plain. Beijing: Geological Press,2000.]
- [12] Tang C-Y,Chen J-Y,Shen Y-J.Long term effect of wastewater irrigation on nitrate in groundwater in the North China Plain [A]. In:Steenvoorden J,Endreny T.Wastewater Reuse and Groundwater Quality[C].IAHS Publ.,2003,(285).34- 40.
- [13] 黄荣辉.密切注视华北干旱发展、加强干旱变化趋势研究[N].科技日报,2001- 06- 19(4).[HUANG Rong-hui.Pay attention to drought development trend in North China. Science and Technology Daily,2001- 06- 19(4).]
- [14] 黄嘉佑.北京地区季节旱涝长期变化趋势[J].水科学进展,1992,3(1):59-64.[HUANG Jia-you.Long-term trend of seasonal drought/wetness in Beijing region.Advances in Water Sciences,1992,3(1):59- 64.]
- [15] Liang X-Z,Sameh A-N,Wang W-C.Observed and GCM simulated decadal variability of monsoon rainfall in east China [J]. Climate Dynamics,1995,11(2):103- 114.
- [16] 龚道溢,史培军.华北农牧交错带夏季降水变率及其与前期下垫面热力状况的关系[J].自然资源学报,2001,16(3):211~215.[GONG Dao-yi,SHI Pei-jun.Variability of summer rainfall over northern China and its association with thermal conditions at early stage underlying surface.Journal of Natural Resources,2001,16(3):211- 215.]
- [17] Kendy E,Gerard-Marchant P,Walter M T,et al.A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J].Hydrological Processes,2003,17: 2011- 2031.
- [18] 徐富安,赵炳梓.豫北地区水分生态环境演变及其原因初探[J].地理科学进展,1998,17(增):71-77.[XU Fu-an,ZHAO Bing-zi.The development of ecological environment factors related with water in North China Plain.Progress in Geography,1998,17 (sup.):71- 77.]
- [19] Riches M R,W-C Wang,P-Q Chen,et al.The Joint Agreements on' Global and Regional Climate Change 'Studies Between the United States and the Peoples Republic of China[J].Bull.Am.Meteo.Soc.,2000,81:491- 500.
- [20] Yang D,F Sun,Z Liu,et al.Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses[J].Geophys.Res.Lett.,2006,33,L18402,doi:10.1029/2006GL027657.
- [21] Shen Y-J,Xiao J-Y,Kondoh A,et al.Influence of land use and land cover change due to urbanization on hydrological environments:a case study of Shijiazhuang,China [A].In:Proceedings of the CERES International Symposium on Remote Sensing:Monitoring of Environmental Change in Asia[C].Chiba,Japan,2003.25- 28.
- [22] 宋献方,夏军,于静洁,等.应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望[J].地理科学进展,2002,21(6):527~537.[SONG Xian-fang,XIA Jun,YU Jing-jie,et al.The prospect in the research of water cycle at the typical catchments of North China Plain using environmental isotopes.Progress in Geography,2002,21(6):527- 537.]
- [23] Kitacka K.A model of quality distribution in groundwater with reference to natural tritium concentration[J].J.Groundwater Hydrology,1988,30:77- 79.

An Integrated Analysis of Hydrological Changes in Shijiazhuang Region Due to Socio-economic Development in the Past 70 Years

SHEN Yan-jun¹, SONG Xian-fang², XIAO Jie-ying³, CHEN Jian-yao⁴, TANG Chang-yuan^{5, 2}

(1. Agricultural Resources Research Center, CAS, Shijiazhuang 050021, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Japan; 4. School of Geographical Science and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 5. Faculty of Horticulture, Chiba University, Japan)

Abstract :Urbanization and associated economic development of China have experienced a speedy increase in last decades. Consequently, the local and surrounding areas of large cities in North China are facing to the problem of water scarcity. The current research investigates the development of water resources in Shijiazhuang area during the last 70 years and the associated change of hydrological cycle through historical data analysis, field survey, and groundwater quality and isotopic analysis. This investigation shows the local groundwater of Shijiazhuang mainly accepts vertical recharge through river channels and the lateral recharge from the aquifers in mountainous areas. Urbanization, industrialization, and development of agriculture have largely altered the natural hydrological cycle in the past 70 years, especially the recharge and discharge structure of groundwater system, which could be balanced and self-regulated formerly. Continuous dry-up of rivers in the study area cuts off the major vertical recharge source of groundwater. Meanwhile, the extensive exploitation of groundwater due to municipal, industrial, and agricultural use makes the urban area sifting to a groundwater discharge region from the formerly recharge region. Moreover, the chemical composition of groundwater and its spatial distribution illustrate the change of water quality and regional hydrological environments as well as the drop of groundwater table.

Key words: socio-economic development; hydrological change; water resources development; hydrological cycle; water chemistry