

# 利用北调江水补充调蓄石家庄地下水的工程技术方法探讨

张 云 王秀艳 刘长礼 张 明

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所生态地质环境研究部, 河北 正定 050803)

**摘要:**石家庄是中国北方水资源危机较严重的城市之一,已形成了超采地下水的巨大降落漏斗。结合其毗邻滹沱河宽阔河滩,地面水可直接入渗补给降落漏斗内地下水的有利水文地质条件,实施利用北调江水补充调蓄地下水工程,将具有现实意义。该文针对北调江水可能存在的不同水质情况,应用现有较适宜的地下水调蓄方法和相关的水质净化技术或研究成果,选择滹沱河河道、河漫滩上采砂坑及其他有利的条件场地等,就利用北调江水补充调蓄地下水工程,进行了相关技术方法探讨,提出一个较适宜的工程技术方案,以期能为石家庄水资源的战略调控服务。

**关键词:**北调江水;补充调蓄地下水;水质净化;工程技术方案

**中图分类号:**P641.25 **文献标志码:**A **文章编号:**1000—3657(2007)01—0160—06

水是地球生物维持生命的必要物质,是人类生产和生活的重要资源。地下水是水资源的组成之一,亦是一种战略性储备资源。中国城市供水 30%源于地下水,北方城市对地下水的依赖程度更高。然而,长期超采使用地下水,已造成一些地区水位急剧下降,形成了许多降落漏斗。供水资源、战略储备资源的严重枯萎,已制约、困扰了这些地区的经济发展。利用外调水源对其地下水进行补充调蓄,将是解决这种困扰的重要途径之一。它既可有效补充地下水资源,还可恢复优良生态环境、调节气候、消除因地下水位下降引发的各种灾害隐患等。

石家庄是利用地下水程度较高的城市之一,伴随城市与经济的发展,地下水资源消耗量逐年递增,长期超采使地下水位不断下降。目前,城市中心地下水位已下降到了 60 多米深,形成了 400 多平方千米面积的降落漏斗。不仅水资源量减少,还引起了诸如水质恶化、自然植被退化、开采井群报废等生态环境与经济负效应问题。已成为资源型缺水与生态环境恶化并重的城市之一。借助南水北调中线受益的机遇,利用北调江水补充调蓄地下水,将是缓解目前水危机压力的最好方法。这种利用地下水含水层库容实行对地下水补充调蓄,改善生态环境的方法,是国内外普遍通行的做法。具有恢复生态环境、改善水质、不易污染、不占地、好管理等优点,将成为中国北方缺水城市解决水资源和恢复生态环境的良好方

法。如美国、加拿大、欧盟 12 国、日本、沙特阿拉伯、阿曼、印度等,已经放弃传统的修建地表水库储水方法,越来越多地利用地下水含水层的广阔空间,建立地下水库,恢复地下水资源,调节供水紧张局面。中国辽宁、北京、山东、台湾等地区,也成功地通过人工补水方法,向地下水含水层中补水以恢复和改善地下水资源及其环境。为此,笔者针对石家庄目前面临的水危机压力,结合其环境地质条件,利用北调江水补充调蓄地下水资源的技术方法问题,进行了相关探讨。

## 1 研究区环境地质特征

### 1.1 环境地质特征

石家庄位于华北平原西缘与滹沱河交汇地带,西与太行山相邻,东为广阔的山前平原。构造上处于滹沱河冲洪积扇的轴部地带,主要为山前冲洪积、坡积群及剥蚀垆岗地貌。区内地形相对平坦,地势高差较小,由西向东略微倾斜。滹沱河自市区西北不远的黄壁庄水库一带,呈东偏南方向由北翼穿过,现已干涸,宽阔的河道、河滩砂层裸露。研究区内包气带岩性多为层状非均质分布,厚度在 34~60 m,由亚粘土、亚砂土、砂、砂砾等组成。地表以亚粘土出露为主,也有少部分亚砂土和条带状砂层出露(图 1)。

研究区内地下水主要赋存于第四系松散岩层孔隙中,地

收稿日期:2006-07-04;改回日期:2006-09-16

基金项目:石家庄市科学研究与发展计划项目资助。

作者简介:张云,男,1963 年生,助理研究员,主要从事环境地质、环境工程、环境生物研究等工作;E-mail: zhangyun9198@sohu.com。

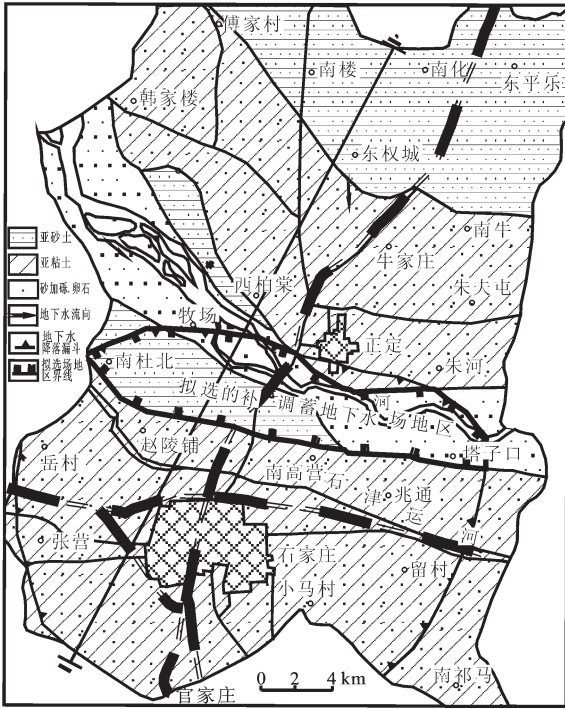


图 1 滹沱河流域石家庄一带地表出露岩性及降落漏斗分布范围

Fig.1 Lithology exposed on the surface in the vicinity of Shijiazhuang in the Hutuo River valley area and distribution of the cone of depression

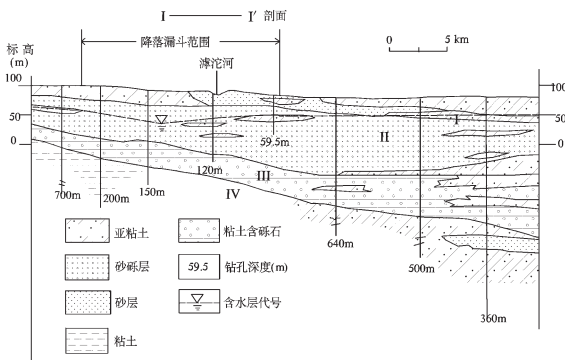


图 2 石家庄地带横断滹沱河浅部岩性剖面图

Fig.2 Lithologic section across the shallow part of the Hutuo River area, Shijiazhuang

下水较丰富,是石家庄的主要水源地,也是河北平原深层地下水的径流补给源区之一。区内第四系浅部松散岩性自上而下主要为:亚粘土、亚砂土层,厚 8~18 m;中细、中粗砂层,厚 50~100 m。地下水位埋深一般在 34~35 m,降落漏斗地带为 34~60 m(图 2)。

### 1.2 有利的水文地质条件特征

区内有利于补充调蓄地下水的水文地质条件有:(1)含水层结构简单,为典型山前平原单一包气带防护与巨厚松散

砂层结构分布特征。只要揭穿防护土层,水便可直接进入巨厚的地下含水层中,并通过含水层的水力联系和传导作用,将补充水源均匀分散到下游不同部位。(2)含水系统岩性渗透性强,根据岩性和富水性,石家庄市至滹沱河一带为强富水区,渗透系数多在 100~300 m/d<sup>[1]</sup>,较强的岩性渗透性,有利于入渗水源的快速渗滤。(3)滹沱河河床及河漫滩一带,为人渗补给的“天窗”地带(图 1~2)。该地带地表砂层裸露,以中粗砂、砂卵石及中细砂为主,只局部分布有薄层粘土-亚粘土透镜体,岩性结构单一,厚度大,垂直渗透性强。具备良好的入渗条件,综合入渗系数为 43%,外来水可直接补进地下含水层中。(4)由于多年超采地下水,自上世纪 60 年代以来逐步形成了石家庄现今 400 余平方千米面积的地下水位降落漏斗(图 1~2),可直接作为补充水源的储蓄场所。

## 2 利用北调江水补充调蓄地下水的基本构想

根据上述有利水文地质条件,配合南水北调的运行,利用分配结余的北调江水实施补充调蓄石家庄地下水工程,将极大缓解石家庄的水危机效应和提高它的应急供水功能。基本构想如下:首先,南水北调中线通水后,近期分配给石家庄的水量为 7.2 亿 m<sup>3</sup>,远期分配水量为 9.5 亿 m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。而一旦遇到丰水年,分配水量将会出现富余,利用地下水库的调蓄作用,把这些富余水存储起来供枯水期使用,不仅起到了有效调节水资源量的作用,还提高了应急用水能力;其次,可将石家庄现成巨大的降落漏斗库容作为近期调蓄地下水的目标容量;再次,选取降落漏斗范围与滹沱河的交汇地带作为对地下水调蓄的工程场地靶区。当北调江水为优质水源时,选择靶区中分布的干涸河道和采砂坑,采用淹水连续入渗和河道漫流入渗方式,进行大规模的利用优质江水补充调蓄地下水工程。而当北调江水水质不稳定时,选择靶区中分布的具除污净化作用的细砂、亚砂土层,以适宜的入渗方法和必要的人工辅助措施,进行利用可能存在水质问题的劣质江水补充调蓄地下水工程。实现利用北调江水对石家庄地下水资源的有效调蓄和战略储备。

## 3 利用北调江水补充地下水的潜在污染指标分析

### 3.1 北调江水水质与石家庄地下水质的比较

南水北调中线调水区是湖北丹江口水库,根据近几年对丹江口水库的主要水质指标监测情况及相关水质状况报道揭示,调水区的天然水质较好。在正常情况下可满足 I 级地下水质的指标有氯化物、砷化物、总汞、六价铬、铜等,可满足 II~III 级地下水质的指标有 COD<sub>Mn</sub>、氨氮、亚硝酸、挥发酚、氰化物、镉等,只有大肠菌群仅满足为 IV~V 级地下水质。此外, Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、TDS 等无机盐类物质和铁、锰、铜等含量也显示不高,低于一般地下水含量。

而根据多年对石家庄地下水质的检测表明,其地下水水质

总体良好。水质可满足 I 级地下水质的指标有氟化物、六价铬,可满足 I~II 级地下水质的指标有氯化物、COD<sub>Mn</sub>、砷化物、总汞、铜、镍等,可满足 II~III 级地下水质的指标有亚硝酸氮、挥发酚、镉、TDS、硫酸盐、钼、钡等,但硝酸氮、锰、铁等多在 II~IV 或 III~IV 级地下水水质间变化。此外,无机盐类含量也明显较高。

由上述看出,丹江口水质除已明显存在大肠菌群的超标污染外,其余水质指标含量均可满足地下水优质水源的要求。尤其无机盐类含量明显低于石家庄地下水;而滹沱河及其附近地下水水质,也基本满足地下水 III 级优质水源要求,多数为 I~II 级。但也存在一些地带的部分指标含量较高。

### 3.2 利用北调江水补充地下水的潜在污染指标分析

上述水质对比结果表明,利用北调江水补充调蓄石家庄地下水时,将可能主要引起大肠菌群类指标污染地下水的问题。同时,据水利部长江水利委员会多年来定期公布的水质情况分析表明,在长年对丹江口水库的水质监测中,还会出现部分地段水体中高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量 BOD<sub>5</sub>、氨氮、挥发酚类等严重污染超标现象。并且由于中国的地下水水质标准往往严于地表水质标准,依据地表水质标准达标输出的优质水源,在利用为地下水的补充调蓄水源时,将可能引起一些指标物质对地下水的污染或冲击。因此宜将上述可能超标突出的大肠菌群、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量 BOD<sub>5</sub>、氨氮、挥发酚类指标等,作为利用北调江水补充调蓄地下水时的潜在水质污染指标进行监控。

## 4 调蓄石家庄地下水的方法选择

### 4.1 调蓄石家庄地下水的方法选择分析

利用外调水源补充调蓄地下水的应用方法很多,按成徐州等<sup>[9]</sup>以补充调蓄形式的划分为:(1)注射井入渗法。(2)直接地表入渗法,包括漫灌、塘灌、沟灌等。(3)间接入渗法,为利用其他渗滤场所进行的入渗,如通过河床、渗渠等利用水压实现的入渗等<sup>[9]</sup>;此外按张自杰等<sup>[10]</sup>介绍的目前世界常用的方法有:慢速土地渗滤系统(SR)、快速土地渗滤系统(RI)、地表漫流系统(OF)、废水湿地处理系统(WL)、地下渗滤土地处理系统(UG)及人工土壤层快速渗滤系统(ARI)等<sup>[11]</sup>,但 these 方法通常用于污水处理。

在上述方法中,各有优势和不足。还没有一种方法能够满足或基本满足补充调蓄地下水工程的高效、处理水量大、蒸发损失量小、尽可能占地较少、不污染地下水等要求。但其中的深坑入渗法、河道漫流入渗法和快速土地渗滤法或人工土壤层土地渗滤法等的优势集成,可基本满足这些要求。深坑入渗法,是将外来水源通过与地下水直接沟通且又渗透性较强的自然深坑输进地下水中的入渗方法。而河道漫流入渗法,是将外来水源通过沿一定长度的干涸河道或河漫滩自流,形成下渗进入地下水中的入渗方法。二者均具有运转管理简便、成本低廉、快速高效、单位时间的调蓄水量较大、所需投入辅助设施较少等优势。但如果渗滤地层颗粒较粗,将

无法对入渗水中的大肠杆菌及其他污染物产生有效净化作用,水质保障程度不高,且蒸发损失量偏大。只适宜选择为针对较好水质入渗的调蓄方法;快速土地渗滤入渗法或人工土壤层土地渗滤入渗法,是将外来水源通过周期性地向快速渗滤田(为天然细砂、粉砂或中细砂)或人工渗滤田(为中细砂与一定比例粘土的混合介质)布水和落干,使田块表层的土壤处于厌氧、好氧交替运行状态,借不同种群的微生物对被渗滤田土壤阻截、吸附的悬浮物、有机物、氨氮等进行分解转化,达到使水体过滤净化后再输进地下水含水层的入渗方法。它们具有成本低廉、快速有效、蒸发损失量较小、占地不大、水质保障程度高等优势。但又存在前期投资偏大,单位时间的调蓄水量偏小,运转管理要求高的不足。适宜选择为针对较差水质入渗净化的调蓄方法。因此,宜将这几种方法组合运用,扬长避短,才可根本满足利用外调水源补充调蓄地下水的工程需要。

但这几种方法要成功应用,还将取决于入渗区包气带土层特性和水文地质条件特征的变化影响(如包气带岩性、渗透性、吸附性、CaCO<sub>3</sub>含量、碱度、阳离子交换容量、地下水埋深、隔水层结构等的影响)。不同地区的这些条件特征有较大差别,其具体的工艺技术也因地而异,无法照搬套用。各地区在相互借鉴及吸收经验技术的同时,还需结合本地包气带岩性与水文地质条件特征,进行具体的工程技术探讨或研究,才能确定出适合于本地的方法和工程技术。

此外,水质净化中还涉及到了铵氮、硝酸氮的同时净化与净化水量不能过小的限制性影响制约。因为铵氮与硝酸氮的净化机理不同,又要求在同一时段、同一不宜过小的入渗水量下淹水进行。对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>吸附来说,有一个吸附容量限制,进水量不能过大,易使水力停留时间较短。而对于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的反硝化脱氮来说,又受到脱氮菌群在每回次(相邻的淹水期和落干期构成一个回次)淹水期中的适应期与脱氮反应速率快慢的影响,其水力停留时间又不宜过短。因此,氨氮与硝酸氮的协调去除成为了北调江水补充调蓄地下水时水质保障的限制性影响因素。只要氨氮、硝酸氮能够协调净化、去除,其他污染物就容易得到净化、去除。所以,还需专门探讨补充调蓄石家庄地下水时的水质净化技术问题。

### 4.2 补充调蓄石家庄地下水的水质净化技术支持

依据前述的相关分析,在利用北调江水补充调蓄石家庄地下水时,将可能存在大肠菌群、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量(COD<sub>5</sub>)、氨氮、挥发酚等潜在污染物指标,对地下水的污染或冲击。因此,需要有相应水质净化技术的支持,才能达到安全调蓄地下水的目的。

#### 4.2.1 限制性影响氮素的净化技术

##### (1) 氨氮组分的净化技术

通常铵氮污染物的净化去除需要在淹水与落干期的交替中进行。在淹水期,主要由渗滤介质表面施以对铵氮污染物的吸附过滤作用。在落干期,主要是借助落干时段的暴气充氧条件促进微生物硝化作用的发生,使吸附在渗滤介质表



面的铵氮污染物大量转化为硝酸氮产物,腾出吸附铵离子的格位,恢复渗滤介质对铵离子的吸附能力。

据张云等<sup>[9]</sup>专门针对石家庄滹沱河一带砂土的实验研究揭示:①分别采用 2 m 厚的中砂、细砂及细砂与一定比例粘土混合等渗滤介质,可对入渗液中的铵氮污染物产生不同程度的截留去除效果,其单位土重截留量变化为:0.133 mg·kg<sup>-1</sup>~2.223 mg·kg<sup>-1</sup>。并以细砂+10%粘土介质的截留能力最大,可达 2.223 mg·kg<sup>-1</sup>(入渗液铵氮浓度为 0.5mg·L<sup>-1</sup>)和 1.369 mg·kg<sup>-1</sup>(入渗液铵氮浓度为 0.2 mg·L<sup>-1</sup>),中砂介质最小,为 0.322 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.133 mg·kg<sup>-1</sup>。且当入渗液铵氮浓度为 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 时的单位土重截留量要大于 0.2 mg·L<sup>-1</sup> 时的入渗液。②各类渗滤介质的单位土重截留量均随实验回次增加而有减小趋势,当采用加大干湿比及增加渗滤介质的环境湿度、碱度的办法时,可有效减轻这种减小趋势<sup>[9]</sup>。

研究表明,利用细砂或细砂加一定比例粘土混合介质作为渗滤层,及辅助以一定人工措施,能基本对入渗水中的氮氮组分形成较有效的截留去除。可利用作补充调蓄地下水时污染物净化的渗滤介质,同时,还可直接作为承担较好水体对地下水入渗补充的渗滤介质。

(2) 硝酸氮的净化去除技术

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>污染物的净化去除主要发生在淹水期,据张云等<sup>[9]</sup>针对石家庄滹沱河一带砂土的实验研究揭示,自然状态下细砂或细砂加一定比例粘土的混合渗滤介质系统,对入渗水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>污染物的净化效果不理想,最大去除率为 4.8%~19.6%,平均为 10.7%,无法形成有效净化去除。也难获得这些回渗处理系统的最佳干湿比、污染负荷、水力负荷、水力负荷周期等参数,分析原因主要是因缺乏营养碳源所致。但由张胜等<sup>[9]</sup>的实验研究揭示:利用人工强化向细砂柱中投入一定优选菌种液和按 0.05%体积比乙醇营养碳源物质,在保持一定入渗水位和较缓慢的供、出水流速条件下,将待净化高浓度硝酸氮液体由砂柱顶面入渗滤下,可对入渗液中硝酸氮污染物形成有效净化去除,去除率可达 90%以上。但存在脱氮微生物产生净化作用的适应期偏长问题,需设法缩短<sup>[9]</sup>。

张胜等<sup>[9]</sup>的研究表明,利用细砂柱及伴随注入优选菌种液和 0.05%体积比乙醇营养碳源物质,可形成对入渗水中硝酸氮含量达 90%以上的净化、去除效果。可将此方法选为补充调蓄地下水时,净化硝酸氮的主要应用方法。

4.2.2 大肠菌群等其他污染物的净化去除技术

大肠菌群等其他污染物的净化去除,也发生在淹水与落干暴气的交替运行中。经汪民等<sup>[9]</sup>的实验研究揭示:在污染水体快速入渗条件下,经过 2~4 m 厚的细砂或中细砂层的淹水渗滤及与落干暴气的交替进行,可对大肠菌群等其他主要污染物(无机盐类物质除外)形成较有效的去除,去除率在 32%~99%。揭示在有利的场地条件下,利用一定厚度的细砂或中细砂介质层,采用淹水渗滤及与落干暴气的交替进行,可对入渗水中大肠菌群等其他主要污染物形成一定的净化去除效果。其中,经过 2 m 左右厚细砂层净化,对有机质污染物的去

除率一般在 80%~90%以上;经 4 m 多厚的中细砂层净化,对大肠菌群的去除率为 90%以上;经 2 m 多厚的细砂层净化,对悬浮物(SS)的去除率为 82%~94%;经 2 m 多厚的细砂层净化,对挥发酚物质的去除率为 74%~99%;经 2 m 多厚的细砂层净化,对无机常量组分的净化去除不明显<sup>[9]</sup>。

研究表明,利用一定厚度的细砂层,可对入渗水中大肠菌群等污染物形成较有效的净化、去除,但对无机盐组分的净化去除不明显。因此,可将此方法选为补充调蓄地下水时,净化、去除大肠菌群等污染物的主要应用方法。

5 利用北调江水补充调蓄地下水的工程技术方案

5.1 前期工程建设方案

(1) 结合南水北调分水方案,在入渗场地区建立输水配水站,以利于协调、管理和分配水源。

(2) 选取滹沱河与石家庄降落漏斗的交汇地段,作为补充调蓄地下水的主体工程场地区(图 3 中粗线范围;A1-A3、B1-B5 地带),并进行护坡护岸加固,增建拦水堤坝(橡皮坝或砂坝),疏通滹沱河河道。同时,对选定为实施工程场地的河道及采砂坑,进行适当修整加固,以增强其边坡稳定性和冬天的防冻设施。且在每个坑底垫上 4 m 厚的中细砂层及进行边壁防渗漏处理。

(3) 在靠近主体工程场地附近,选择具有一定除污净化能力的中细砂、亚砂土分布地带,作为补充调蓄地下水的辅助工程场地区(图 3 中 C2 或 C3 地带,C1 为备选场地),并构建多块 2 m 左右厚的人工渗滤田,两块 2 m 左右深填充了滤料的反硝化脱氮池,多块好氧反应田。

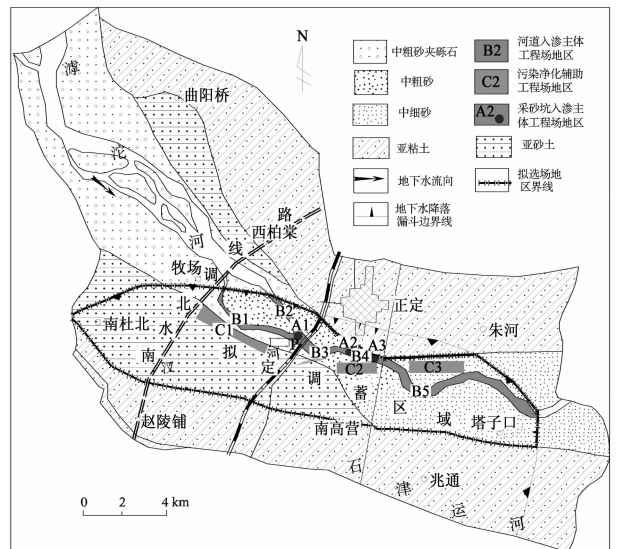


图 3 拟选实施北调江水补充调蓄石家庄地下水的工程场地结构图

Fig.3 Configuration map of the site of the proposed project of recharging groundwater in Shijiazhuang with water diverted from the Yangtze River

(4)架设输水管道及相应控制设施、寒冬防冻设施建设等。

(5)沿选定调蓄场地两岸建设水源涵养林、防风固沙林及观赏花木、植物园等,并加强滹沱河两岸的治污力度。

## 5.2 利用优质北调江水补充调蓄石家庄地下水的工程技术方案

首先,在上述选定主体工程场地区内分布有中细砂层的B3、B4、B5地段,采用分段河道漫流入渗法,进行利用优质北调江水对地下水的补充调蓄,可有效过滤去除大肠菌群(当然,也可通过预先杀菌消毒办法去除大肠菌群);其次,在上述选定场地区的采砂坑里(图3中A1~A3地带),由于坑深较大,一般在10~18 m,坑底至地下水位之间一般仅有中砂、中粗砂层分布,保障不了对大肠菌群的过滤去除。若考虑在砂坑底垫上一定厚度的中细砂,并作边壁防渗漏处理,将会形成对大肠菌群的有效过滤去除。

因此,可将上述滹沱河河道的B3、B4、B5地段及A1、A2、A3采砂坑一道,选择为实施补充调蓄地下水的主体工程场地区(图3)。当北调江水为优质水源时,利用天然深坑淹水入渗、分段河道漫流入渗及与落干暴气的交替进行方式,对石家庄地下水实行补充调蓄工程。并在落干期对底部进行0.5~1.0 m深的人工翻犁暴气浮晒,以促使截留于砂层的大肠菌群经光辐射作用杀灭。这样,即可实现利用优质北调江水对石家庄地下水资源的有效补充和战略调控。

## 5.3 利用水质不稳定北调江水补充调蓄石家庄地下水的工程技术方案

依据相关研究结果及成功经验,利用选定辅助工程场地区(图3中C1、C2或C3地带)内分布的细砂、亚砂土对污染物具有的渗滤净化作用,配合前期工程建设,当北调江水水质不稳定时,采用(1)在已建立的渗滤田,周期性交替进行淹水和落干氧化,以净化去除入渗水中的氨氮、有机污染物、挥发酚等污染物。(2)在反硝化脱氮池按一定量比(如0.05%体积比)添加乙醇碳源及接种脱氮微生物优势菌种,以净化、去除前一道工序出水中的硝酸氮污染物。(3)利用脱氮后处理好氧反应田,进一步对反硝化脱氮池的出水,进行过滤与好氧暴气的交替净化处理,去除水中仍可能残留的有机类、大肠菌群及其他污染物类等。经此3道净化工序,可有效消除大肠菌群、氨氮等污染物对地下水的污染或冲击,实现对石家庄地下水资源的有效补充和战略调控,出水可直接进入地下水中。

## 6 结 论

经以上探讨表明,采用天然深坑淹水入渗法、分段河道漫流入渗法、快速土地渗滤技术或人工土壤层渗滤技术等综合方案,来实施利用北调江水补充滹沱河地下水是基本可行

的。当北调江水水质较好时,采用天然深坑淹水入渗法、分段河道漫流入渗法及分别与落干暴气交替进行的技术,实施对地下水的补充调蓄。而当北调江水水质不稳定时,采用快速土地渗滤技术或人工土壤层渗滤技术,并结合人工强化对硝酸氮的净化去除技术,实施对地下水的补充调蓄。如此,既可满足达到高效、蒸发损失量小、尽可能占地较少、补充调蓄量大的工程要求,又可使补充调蓄后的地下水水质满足要求,真正达到补充调蓄地下水资源,缓解石家庄应付水危机能力的目的。而且此工程方案的实施还将有利于经济效益、生态环境效益及社会效益等方面的提升。

## 参考文献(References):

- [1] 费宇红, 陈树娥, 刘克岩. 滹沱河断流区水环境劣变特征与地下调蓄潜力[J]. 水利学报, 2001, (11): 41-44.  
Fei Yuhong, Chen Shu'e, Liu Keyan. Characteristics of inferior variation of water environment in Hutuohe River dried-up area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (11): 41-44 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王秀杰, 练继建, 杨弘, 等. 石家庄滹沱河地区地下水库研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 5-7.  
Wang Xiujie, Lian Jijian, Yang Hong, et al. Investigation of a groundwater reservoir in Shijiazhuang Hutuohe areas [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35 (9): 5-7 (in Chinese with English abstract).
- [3] 成徐州, 吴天宝, 陈天柱. 城市污水地下回灌技术现状与发展[J]. 中国给水排水, 1999, 15(6): 20-21.  
Cheng Xuzhou, Wu Tianbao, Chen Tianzhu. Municipal wastewater groundwater recharging method [J]. China Water & Wastewater, 1999, 15(6): 20-21 (in Chinese).
- [4] 张自杰, 张忠祥, 钱易, 等编著. 环境工程手册-水污染防治卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 818-848.  
Zhang Zijie, Zhang Zhongxiang, Qian Yi, et al. Environmental Engineering Manual-Water Pollution Prevention and Remediation [M]. Beijing: High Education Press, 1996: 818-848 (in Chinese).
- [5] 张胜, 张云, 张凤娥, 等. 地下水  $\text{NO}_3^-$  污染的微生物修复实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 25-30.  
Zhang Sheng, Zhang Yun, Zhang Feng'e, et al. In laboratory remediation of nitrate-contaminated groundwater using microbial technique [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(2): 25-30 (in Chinese with English abstract).
- [6] 汪民, 吴永峰, 钟佐鑫, 等. 污水快速渗滤土地处理 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-136.  
Wang Min, Wu Yongfeng, Zhong Zuoxin, et al. Wastewater Rapid Infiltration Land Treatment [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-136 (in Chinese).

## Engineering technology of recharging groundwater in Shijiazhuang with water diverted from the Yangtze River

ZHANG Yun, WANG Xiu-yang, LIU Chang-li, ZHANG Ming

(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengding 050803, Hebei, China*)

**Abstract:** Shijiazhuang is one of the cities suffering severe shortages of water resources in northern China, where a huge cone of depression has formed because of excessive exploitation of groundwater. Shijiazhuang is on the broad beach of the Hutuo River and its hydrogeological conditions allow surface water to directly penetrate into the cone of depression and recharge the groundwater. So, it is practically significant to recharge groundwater in Shijiazhuang the water diverted from the Yangtze River. According to different qualities of water from the Yangtze River, by using the existing appropriate groundwater recharging methods and related water purifying technologies and selecting the Hutuo River watercourse, sand pits on flood land and other favorable sites, the technologies of recharging Shijiazhuang groundwater with water from the Yangtze River are discussed and an appropriate engineering technology scheme is put forward, which is expected to serve the strategic control and management of water resources in Shijiazhuang.

**Key words:** water diverted from the Yangtze River; groundwater recharge; water purification; engineering scheme

---

**About the first author:** ZHANG Yun, male, born in 1963, assistant researcher, mainly engages in studies of environmental geology, environmental engineering and environmental biology; E-mail: zhangyun9198@sohu.com.