

管清花,汪玉静,陈学群,等. 济南玉符河重点渗漏带岩溶地下水补给特征与保护[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 233-244.

DOI: 10.11932/karst2022y23

济南玉符河重点渗漏带岩溶地下水补给特征与保护

管清花^{1,2},汪玉静³,陈学群^{1,2},曾桂华^{1,2},辛光明^{1,2}

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250013; 3. 济南市林场, 山东 济南 250002)

摘要:玉符河是济南趵突泉域的重点渗漏带之一,是天然河道型渗漏带,其流域面积较大,具有较好来水条件,且卧虎山水库与锦绣城水库水系联通工程使其具备调水补源的条件,能通过增加外调补水增加重点渗漏带的补水能力。文章根据渗漏补给功能特征,采用RS、GPS、GS、物探测量、水文地质试验等技术手段,利用岩性、构造、地形、渗透性、植被覆盖度五大矢量数据的叠加分析方法,以主河道为中心划定玉符河重点渗漏带的保护范围,并利用变化参数法计算出玉符河重点渗漏带多年平均天然地下水补给量约为1290万 m^3 ,其是岩溶地下水的重要补给来源。玉符河重点渗漏带的补水效果主要是通过提升西郊区域岩溶地下水水位,阻止趵突泉南部山区地下水向北径流过程中的向西分流,使地下水集中向泉水出露区汇聚,从而增大泉水的出流量。在保护渗漏带自然入渗功能的前提下,可充分挖掘玉符河重点渗漏带的补水功能,通过调水补源、河道生态修复、入河污染控制等措施,增大玉符河重点渗漏带的渗漏补给量。

关键词:趵突泉域;重点渗漏带;入渗补给量;岩溶泉水保护

中图分类号: P641.8 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0233-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

济南素有“泉城”的美誉。众多清冽甘美的泉水,在山区、城市中涌出,汇为河流、湖泊。盛水时节,泉涌密集区,呈现“家家泉水,户户垂杨”、“清泉石上流”的绮丽风光。众多泉水疏密有致地分布于济南各地,赋予济南的山水以鲜活的灵气和迷人的魅力。随着城镇化水平的提高,泉水补给区因其良好的自然环境,成为竞相开发建设的区域,南部近城区泉水补给区及重点渗漏带也正面临被覆盖的威胁^[1]。根据研究,济南市区泉流量在降雨和开采条件一致的情况下,近十年济南市泉流量较20世纪50年代

流量降低了10.4万 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,岩溶地下水水位降低了2.4 m,在1999年3月趵突泉连续停喷时间长达926 d,虽经过一系列人工调控措施,至2003年9月泉水开始复涌,但在枯水季节,尤其是春灌期间,岩溶地下水水位下降,泉流量衰减,泉水保护依然面临巨大挑战^[2-6]。

济南南部山区是市区的天然生态屏障,不仅维护城市大气环境的正常新陈代谢,也是整个泉域地下水资源的重要涵养补给区。根据调查济南趵突泉泉域存在24个重点渗漏带,这些重点强渗漏区由于其岩性、构造等特点,渗漏补给岩溶地下水的速度较快,补给能力较强,是济南岩溶泉水的重要补给通道。玉符河渗漏带是趵突泉泉域内重要的河道型渗漏带,

基金项目:水利部公益性专项后续研究项目(SDSKYZX202121);国家自然科学基金面上项目(4237020900);山东省自然科学基金项目(ZR2021QD031)

第一作者简介:管清花(1981—),女,高级工程师,主要从事水文水资源研究工作。E-mail: qhguan0120@163.com。

通信作者:陈学群(1979—),男,高级工程师,主要从事水资源与水环境工作。E-mail: cxq1115@126.com。

收稿日期:2021-01-03

借助于天然的河道优势、水源条件和地下水入渗条件,济南市水利部门多次在玉符河重点渗漏带回灌补源,2014年玉符河重点渗漏带生态补源水量为5304万 m^3 ,2015年生态补源量约4500万 m^3 ,通过对玉符河回灌补源效果的监测分析,借助于玉符河天然的河道优势、水源条件和地下水入渗补给功能,玉符河生态补给对局部地下水的抬升具有重要贡献^[7-12]。重点渗漏带是地表水向地下水补给能力强、补给速度快的“地表-地下含水层连通”区域,本文通过遥感数据、物探测量、DEM解译、水文地质测量分析、工程地质勘察、渗水试验等技术手段,利用ArcGIS空间分析,对玉符河重点渗漏带保护线进行划分,提出

重点渗漏带保护线是刚性生态保护控制线,保护区内区域是泉水的重要补水通道,以期为泉水精准保护、科学保护提供重要依据,为济南城市发展规划和名泉保护规划提供指导。

1 研究区概况

玉符河位于济南趵突泉泉域的西部,马山断裂以东,玉符河重点渗漏带主要是指卧虎山水库坝下至玉符河与104国道交汇处,以玉符河主河道为中心,流域面积为63.25 km^2 ,其河底由砾卵石层覆盖,是地表水渗漏补给地下水的主要通道(图1)。

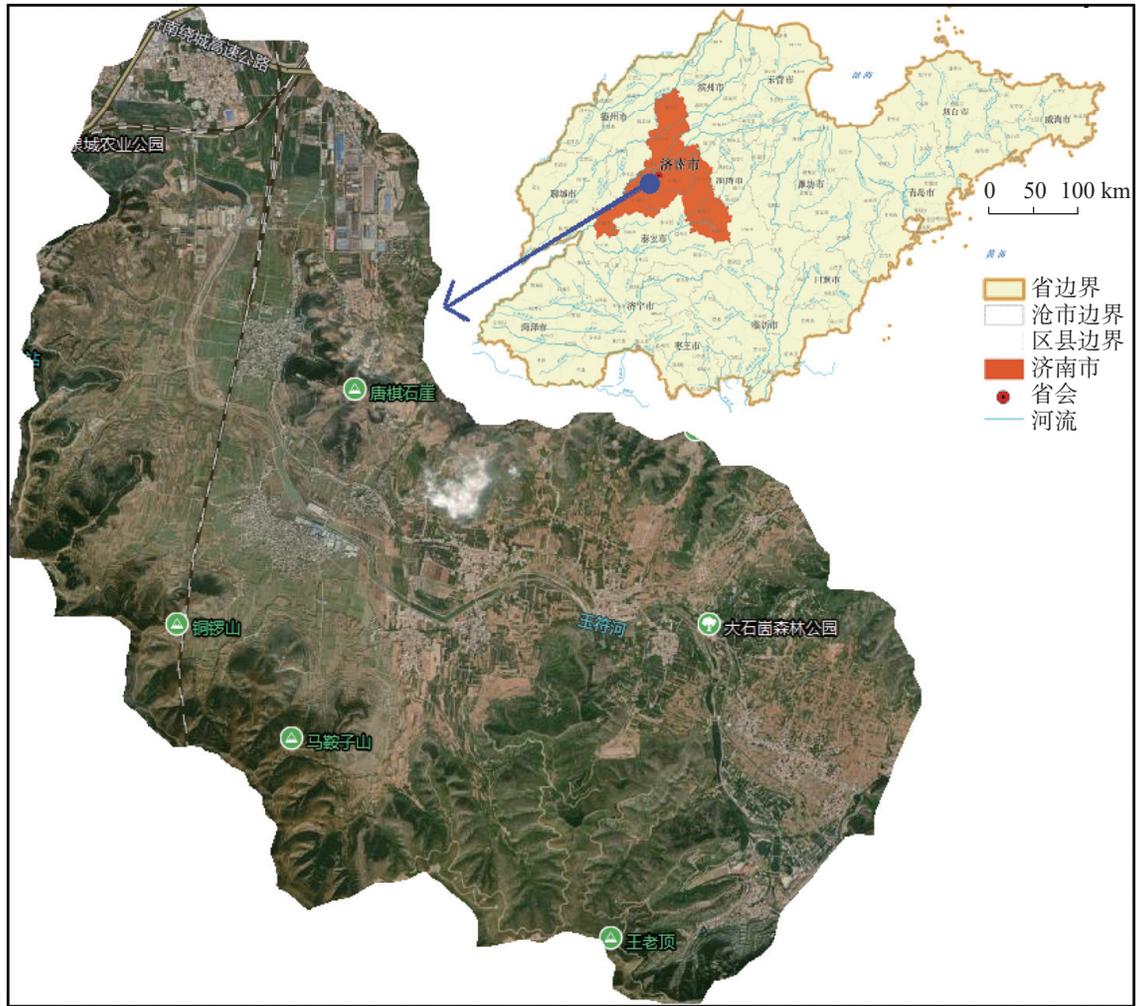


图1 玉符河重点渗漏带位置图

Fig. 1 Location map of major leakage zones in the Yufu river

(1) 区域地质与水文地质特征

玉符河流域上游区属泰山山脉,地势较高,属渗透型石灰岩结构,北部地势较低,属非渗透型的花岗岩结构,自卧虎山水库以下,玉符河流域出露地层主

要为古生界寒武系下中上统、奥陶系下统及第四系。在西渴马地区形成强渗漏带。河道型重点渗漏带一般处于山前冲洪积扇,由沟谷已发育成为河流。玉符河重点渗漏带河底由砾卵石层覆盖,两侧基岩出

露,地层主要为寒武纪中上统、奥陶纪下统及第四系。寒武纪中上统中除炒米店组(ϵ_{3c})地层外,还出露崮山组(ϵ_{3g})黄绿色、黄灰色竹叶状灰岩,河滩、河谷覆盖第四纪(Q)地层,岩溶裂隙发育。

断裂构造主要有炒米店断裂,炒米店断裂为一组 NNE 向展布的断裂,并构成地堑,断裂南起五峰山石窝村,向北过炒米店后隐伏于地下,并在炒米店一带与玉符河斜交。断裂的透水性及导水性较好,周边岩层裂隙发育,岩石破碎,局部发育溶洞,河底主要为渗漏性极强的砾卵石层。

(2) 区域地下水径流场

区域地下水自南向北方向径流,主要接收大气降水和河道渗漏补给,以排泄径流为主^[13]。根据卧虎山水库向玉符河补水试验资料,放水时间从 2001

年 8 月 18 日至 8 月 30 日,卧虎山水库放水量 800 万 m^3 ,至潘村处全部渗补地下,自卧虎山下各段渗水量分别为:宅科至土屋段 90 万 m^3 ,土屋至崔马段 210 万 m^3 ,崔马至潘村段 500 万 m^3 ,日渗漏水量 12.96 万 m^3 。

根据图 2 卧虎山水库放水试验前后岩溶地下水流场可知,总体地下水流场由 2001 年 8 月 18 日的自南向北方向径流,至 9 月 4 日流场整体自南略向东北偏移,其中,自卧虎山下-东渴马-西渴马地下水水位变幅不大,自西渴马-崔马地下水位抬升 5 m,自崔马至当家地下水位抬升近 10 m,总体来看,地下水位抬高较明显,地下水径流方向向东北的趵突泉出流方向偏移。

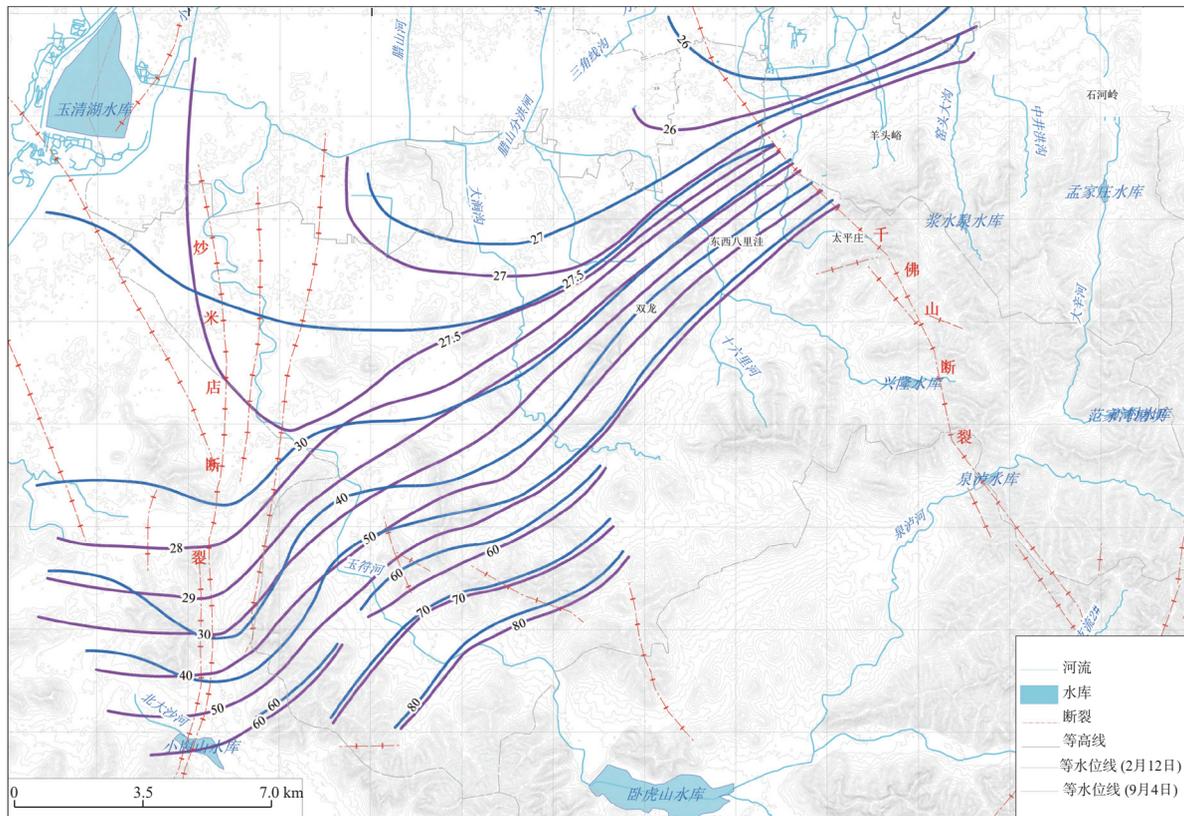


图 2 人工补源试验前后岩溶地下水流场图(2001-08-18 和 2001-09-04)

Fig. 2 Flow chart of karst groundwater before and after artificial filling water tests (2001-08-18 and 2001-09-04)

2 研究方法

2.1 遥感数据

构造解译的遥感影像是针对研究区及周边山区特点,选取波谱和空间分辨率较好的 OLI 影像,本文的

两幅 OLI 影像为美国 Landsat-8 陆地资源卫星图像,影像轨道号分别是 122-34 和 122-35,成像时间为 2015 年 10 月 2 日,该时段为中国北方秋季,天空云量小于 1%,有利于遥感影像信息的分析与提取。为突出断裂构造特征,对 OLI 遥感影像进行预处理、主成分分析、傅里叶变换、假彩色合成,区域断裂遥感影像标志主

要有色调、构造形态、断层三角面、地貌及水系等。

植被覆盖度解译考虑遥感影像覆盖率及时相、云量的因素,选用 16 m 分辨率大幅宽的数据作为数据源。研究区为济南南部,每年 7、8、9 月份植被生长比较旺盛,因此选用 2015 年 8 月 27 日的数据作为遥感数据源开展本区域的植被覆盖度计算。在使用遥感影像前使用正射校正对影像数据进行预处理,消除因大气传输、传感器本身、地球曲率等因素造成的几何畸变,再利用 NDVI 进行计算。

2.2 电法物探测量

电法勘探,又称电测深法,是利用地下岩石及地质构造的电性差异,把不同岩石构造区分开来的一种地球物理勘探方法。测量时,从地表给地层供电,同时测量地表所产生的电位差,通过计算求得地层电阻率。在岩溶地层中,视电阻率高值区反映基岩地层,低值区反映第四系地层,为解译曲线数据方便,需要采用双对数坐标绘制 ρ_s 曲线,寻找电阻率突变点,确定岩溶地区第四系覆盖层的厚度。

2.3 渗水试验

在玉符河重点渗漏带开展了第四系和钻孔渗水试验各三组,分析玉符河重点渗漏带对岩溶地下水的渗漏补给能力。

(1)单、双环渗水试验计算渗透系数,计算公式如下^[14]:

$$K = \frac{Q}{F(H_H + Z + L)} \quad (1)$$

式中: K 为综合渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); Q 为稳定的渗入水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); F 为试坑内环的渗水面积 (cm^2); Z 为试坑内环中的水厚度 (cm); H 为毛细管压力(一般等于岩土毛细上升高度的一半)(cm); L 为试验结束时水的渗入深度(试验后开挖确定)(cm)。

(2)钻孔渗透系数利用下列公式求解:

$$K = 0.423 \frac{Q}{S^2} \lg \frac{2R}{S} \quad (2)$$

式中: Q 为注水流量 ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$); S 为孔内注水水头高度 (cm); R 为钻孔或花管半径 (cm); K 为试验段土层渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

(3)DEM生成数字高程

利用区域 1:1 万地形等值线图,转化成 DEM 数字高程图;通过 DEM 可得到有关区域中任一点的地形情况,计算出任一点的高程,其与相邻单元合并

分析可进行坡度、坡向、地面粗糙度、山脊线、山谷线和高程变化分析,也可进行地貌形态分类及地形剖面线的绘制。

(4)数据空间分析划定保护区方法

利用 ArcGIS 空间分析功能进行数据处理,将图层属性与栅格属性进行叠加处理,通过三步划定重点渗漏带保护区范围:第一步,通过岩性、构造和地形等值线,确定重点渗漏带所在的小流域;第二步,以小流域为单元,利用坡面线在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间的拐点,结合地形等值线,确定重点渗漏带集水盆地的控制线;第三步,利用植被类型与植被覆盖度、第四系厚度及渗透性等进行保护线的校核,确定重点渗漏带保护区位置,计算出重点渗漏带保护区面积。

3 玉符河重点渗漏带特征

3.1 地质、水文地质构造特征

直观上讲,区域断裂遥感影像标志主要有色调、构造形态、断层三角面、地貌及水系等方面,通过遥感结合水文地质现场勘查,结果发现玉符河流域西部是炒米店断裂,东侧有两条中等规模的断层,玉符河北岸,有 3 条小规模断裂构造分布(图 3),走向 NNW—NWW,断裂构造对区域地下水的运移及转化有重要作用,通过构造结合玉符河主河道确定玉符河重点渗漏带所在的小流域。

3.2 第四系厚度分布

玉符河流域地形呈明显的复式河道形态,河道断面由主河槽和河漫滩组成,第四系覆盖层主要分布在河漫滩处,主河槽以卵砾石为主,没有第四系分布,地下水补给能力强,且河漫滩凹岸处的第四系厚度明显高于凸岸第四系厚度。其原因是主河槽内常年受到河流的冲刷作用,原有的第四系覆盖层随着水流的挟沙运动不断向下游河漫滩输移,故主河槽没有第四系分布;而天然河道往往是弯曲河道,弯道水流是螺旋流运动,水流向下游运动的过程中,弯道凸岸受到冲刷,凹岸沉积,所以凹岸处的第四系厚度高于凸岸处的第四系厚度。

利用直流电法物探技术测量玉符河流域第四系覆盖厚度,玉符河重点渗漏带测量剖面总数为 3 个,物探测量点总数为 20 个。图 4、图 5 分别为玉符河重点渗漏带第四系厚度调查位置图和剖面解译成果

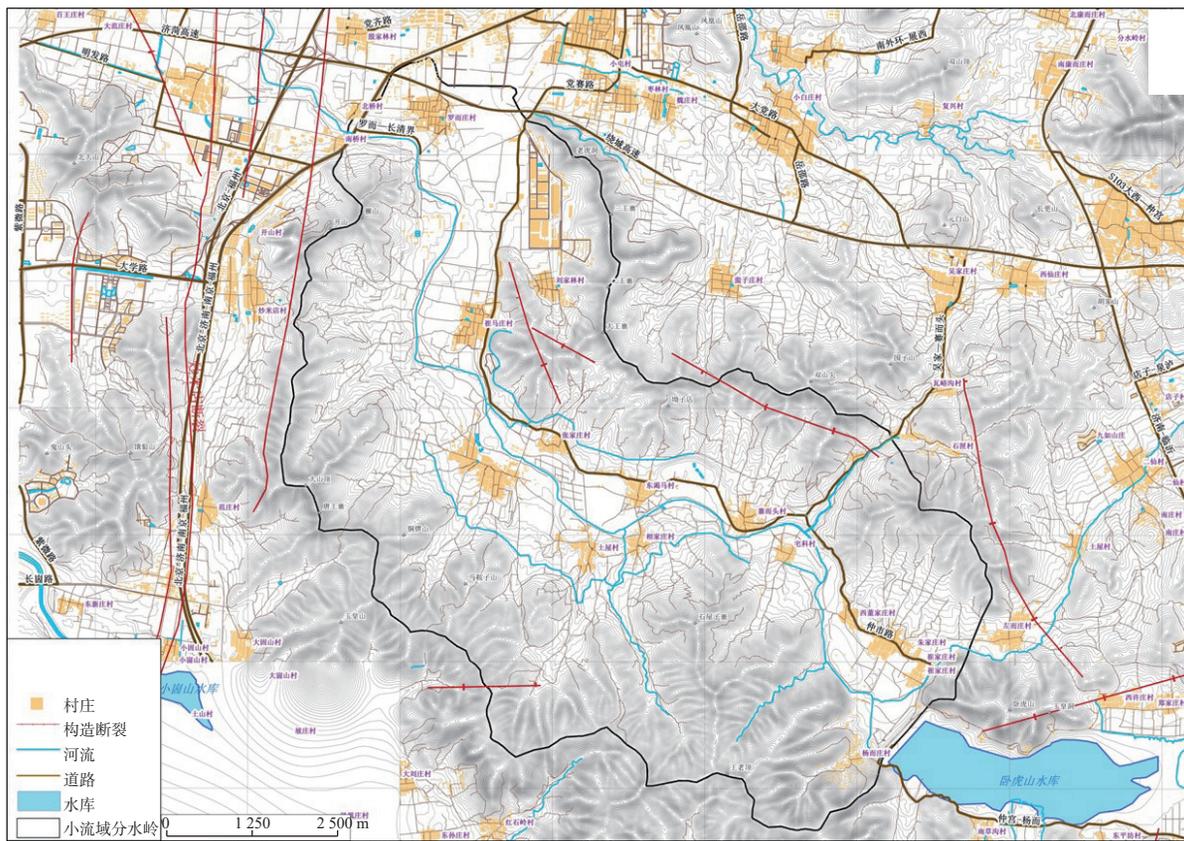


图 3 玉符河小流域遥感构造解译图

Fig. 3 Interpretation of remote sensing structure of the small watershed of the Yufu river

图, L1-L1' 两侧为基岩裸露区, 第四系厚度为 0 m, 中间第四系覆盖厚度最大为 2.1 m; L2-L2' 方向为由北向南, 地形多起伏, 两侧为基岩裸露区, 第四系覆盖度为 0 m, 中间为第四系覆盖区, 第四系覆盖厚度最大为 4 m; L3-L3' 方向为北西向东南, 地形两端高中间低, 两侧仍为基岩裸露区, 第四系覆盖度为 0 m, 中间为第四系覆盖区, 第四系覆盖度最大为 2 m。

由图 5 及钻孔取芯资料可知, 该玉符河重点渗漏带测量范围内第四系厚度整体较薄, 一般在 0~6 m 不等, 上层 0~0.8 m 为黄褐色耕土, 0.8~1.8 m 为黄褐色粉质黏土, 含腐殖质, 1.8~2.2 m 为黄褐色粉细砂, 2.2~4.0 m 为黄褐色砂砾石层, 下伏奥陶系灰岩, 地下水补给能力较强。

3.3 植被覆盖度特征

植被具有截流降雨、减缓径流、保土固土等功能, 影响地下水补给量, 影响泉群流量^[15-16]。玉符河流域内植被覆盖情况以中低覆盖度、中覆盖度和高覆盖度植被覆盖为主, 少见裸露区(图 6)。高植被覆盖度面积有 34.3 km², 占整个流域面积的 54.40%; 中植被

覆盖度面积有 12.1 km², 占整个流域面积的 19.12%; 中低被覆盖度面积有 8.1 km², 占整个流域面积的 12.79%; 低植被覆盖度面积有 1.7 km², 占整个流域面积的 2.73%; 劣植被覆盖度面积有 6.0 km², 占整个流域面积的 9.58%; 非植被区面积有 0.86 km², 占整个流域面积的 1.36%。

3.4 土地利用类型

利用遥感卫片和现场调查结果, 计算出玉符河小流域建设用地面积为 9.01 km², 占小流域面积的 14.28%; 草地面积 13.57 km², 占 21.45%; 耕地面积 22.68 km², 占 35.86%; 林地面积 12.45 km², 占 19.68%; 未利用土地面积 4.66 km², 占 7.37%(图 7)。总体而言, 该流域现状以耕地、草地和林地为主, 但有部分建设用地在河漫滩和河道滩地上。

3.5 渗透补给性能

分别在玉符河重点渗漏带的灰岩隐伏区和第四系覆盖区进行渗水试验, 渗水试验结果见表 1, 过程曲线如图 8 所示。根据单环、双环渗水试验分析, 第四系土层: 1-1 组渗透系数较小, 为 10.49 m·d⁻¹, 1-3

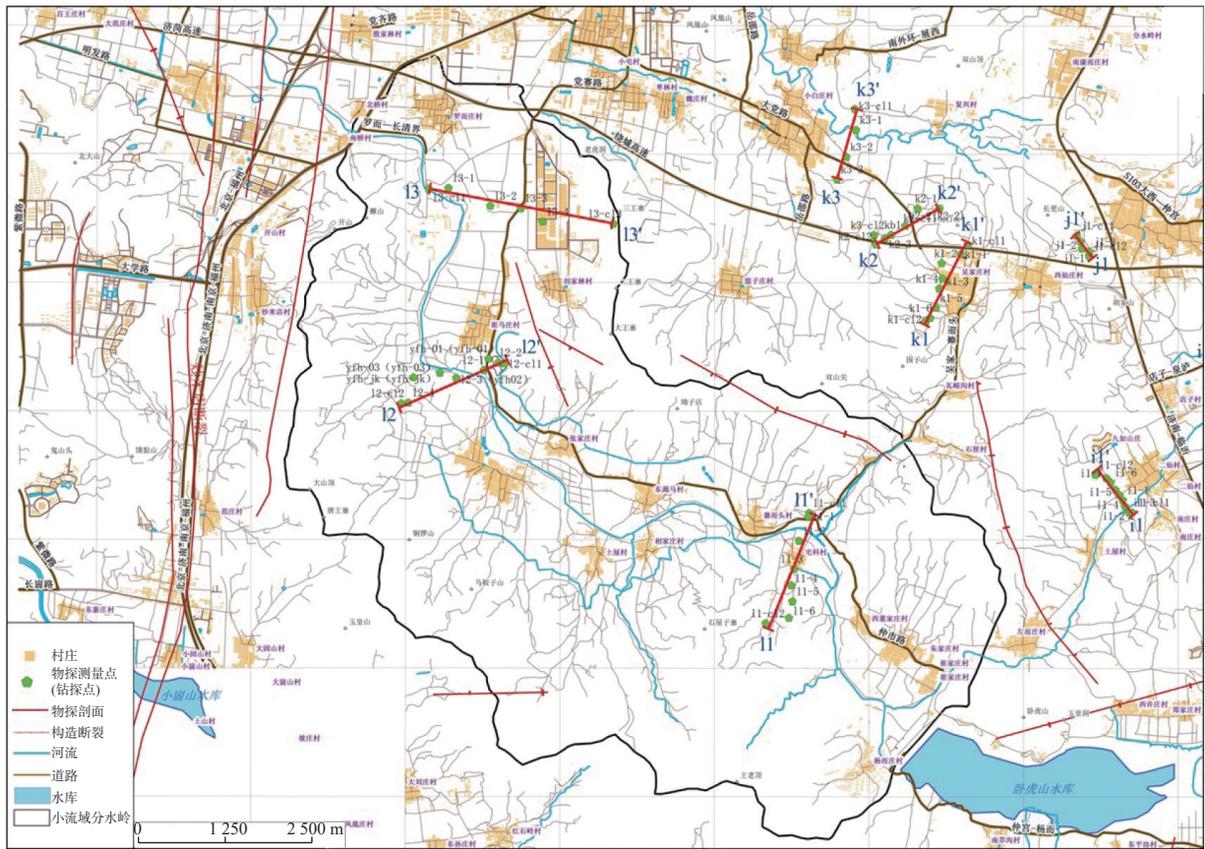


图4 玉符河物探测量剖面位置图

Fig. 4 Section of geophysical surveys in the Yufu river

组较大,为 $23.23 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$;第四系钻孔注水试验:在垂直方向上 3 m 处 YFH2-1 的渗透系数为 $66.66 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 3.86 m 处 YFH2-2 为 $25.28 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 5 m 处 YFH2-3 为 $251.94 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这与玉符河地层的垂直分层性一致,第四系覆盖层自上而下分布:0~3.86 m 松散砂砾石层、3.86~5 m 黏土层、5~6.15 m 卵砾石层。

由此可见,第四系土层的岩性及厚度会直接影响其渗透性能^[17]。粒度较大的砂砾层渗透性好,地下水补给能力强,粒度小的黏土、粉质黏土,渗透性能差,会形成局部隔水层,阻碍表层水分的渗透;第四系覆盖层厚度较小时,大气降水及地表水可渗透后沿岩层层面或断裂构造直接补给地下水,但是第四系覆盖层厚度比较大,特别是含黏土层时,补给地下水的的能力会显著降低。

4 玉符河重点渗漏带成果分析

4.1 玉符河重点渗漏带保护区划分

以玉符河主河道为中心,将 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 附近出现的第一个坡面线拐点作为控制点。借助于地形等高线,

将控制点连接成线,根据植被类型、覆盖度以及第四系覆盖层厚度、渗透性能对初步控制线进行进一步核准,最终确定强渗漏带保护区的控制线,计算出强渗漏带保护区面积。玉符河重点渗漏带保护区划分成果见图 9,玉符河重点渗漏带小流域面积为 63.25 km^2 ,重点渗漏带保护区面积为 27.29 km^2 ,缓冲区面积为 35.96 km^2 。依据河道型渗漏补给岩溶地下水的特征,综合考虑开发建设对重点渗漏带的影响,需要对泉域的重点渗漏带进行重点保护。

4.2 地下水补给量计算

本次研究采用变参系数法计算玉符河重点渗漏带地下水补给量^[15,18]。地下水入渗补给量计算公式为:

$$P_r = 10^{-1} \cdot \alpha_g \cdot F \cdot P_i \quad (3)$$

$$\alpha_g = A_g \log P_i - D_g \quad (4)$$

式中: P_r 为地下水入渗补给量(万 m^3); α_g 为入渗补给系数; F 为流域计算面积(km^2); P_i 为降雨量(mm); A_g 为地形、岩性指数; D_g 为土壤蓄水转化系数。

综合考虑试验数据及济南泉域岩性、土壤性质及水文地质特征, A_g 一般取 0.42, D_g 取 0.87^[19-20]。

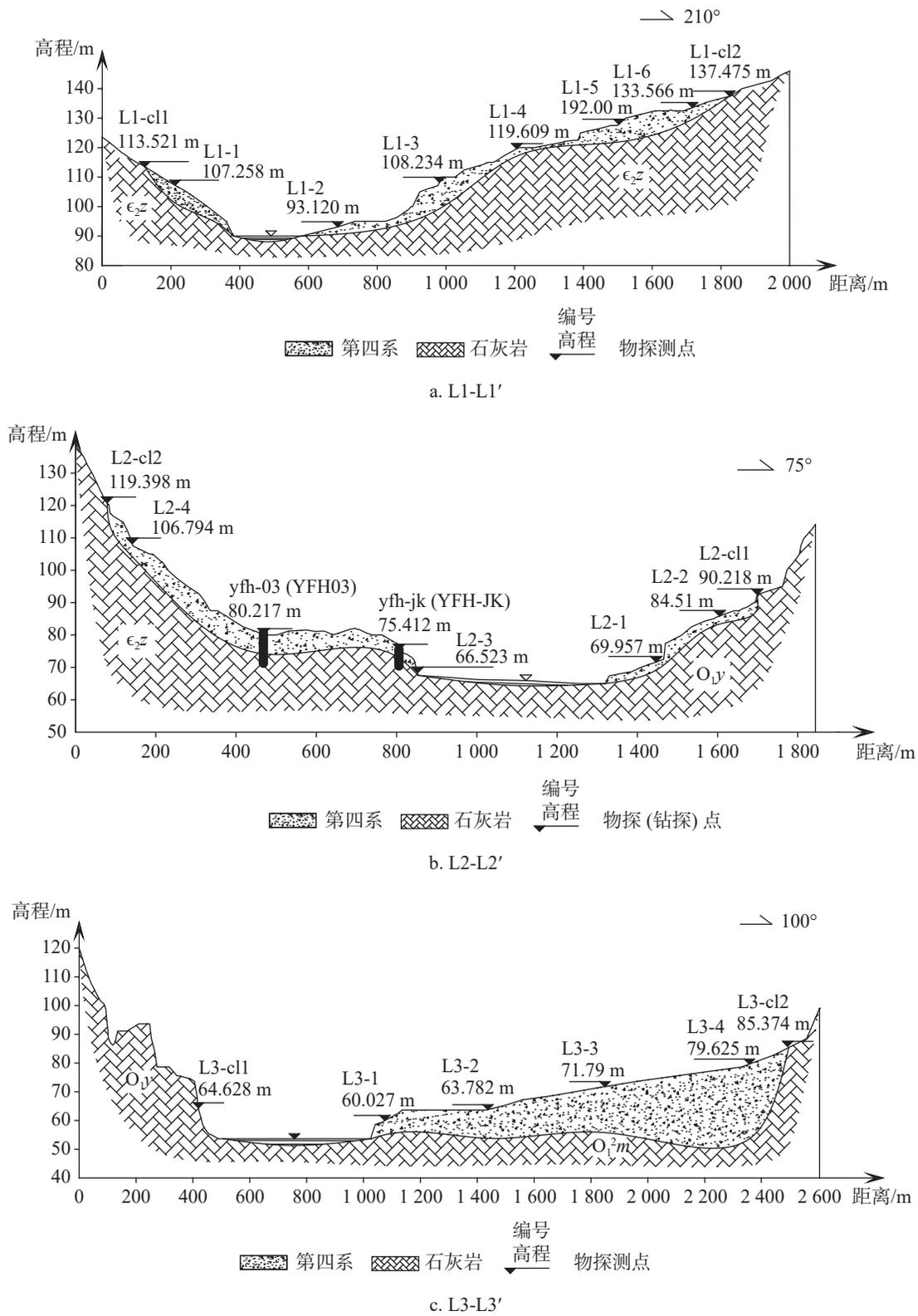


图 5 玉符河重点渗漏带第四系厚度剖面解译图

Fig. 5 Interpretation of Quaternary thickness profile of major leakage zones of the Yufu river

根据玉符河重点渗漏带土地利用现状情况解译结果,该流域建设用地面积达 9.10 km²,渗漏带保护区内硬化面积达 5.01 km²。根据式(3)、(4)计算出玉

符河重点渗漏带地下水补给量为 1 290.36 万 m³·a⁻¹。

此类重点渗漏带地表水渗漏补给地下水主要发生在河道内,河道内一般常年有水,河底砾卵石层对

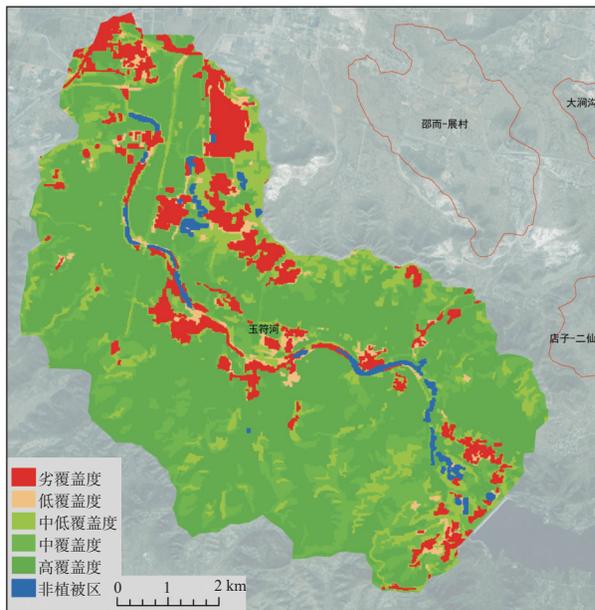


图 6 玉符河重点渗漏带植被覆盖度分区及统计结果

Fig. 6 Statistical results of vegetation coverage and its zoning in major leakage zone of the Yufu river

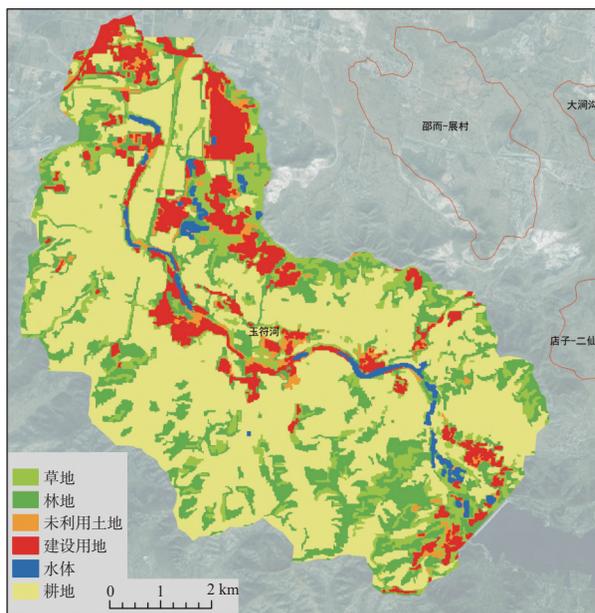


图 7 玉符河重点渗漏带 2015 年土地利用情况

Fig. 7 Land use in major leakage zones of the Yufu river in 2015

地表水体的净化作用较强, 河流中上游一般建有水库, 下游建有拦河堰坝, 河道两侧有较密集的村庄, 存在河道两侧山体破坏、居民建设占用河道、农村垃圾堆放、污水排放等问题。

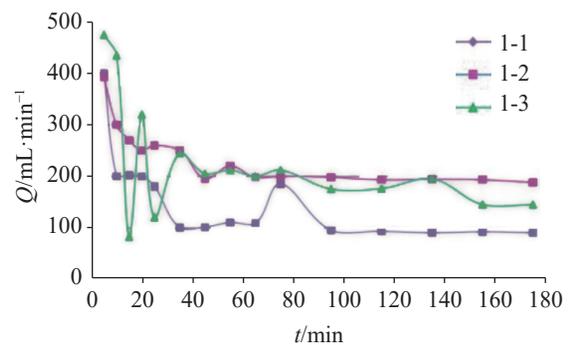
4.3 保护措施

玉符河为河道型重点渗漏带, 主河道是主要渗漏功能区, 应借助现有水利工程条件, 以流域为单位,

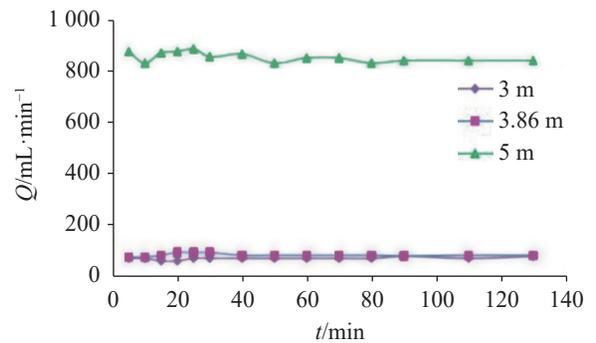
表 1 玉符河重点渗漏带渗水试验成果

Table 1 Infiltration tests in major leakage zones of the Yufu river

类型	试验点号	坐标		K/m·d ⁻¹
		X	Y	
第四系	1-1			10.49
	1-2	36.5205	116.9194	23.23
	1-3			18.13
钻孔试验	YFH2-1			66.66
	YFH2-2	36.5374	116.8869	25.28
	YFH-JK			251.94



a. 第四系



b. 钻孔

图 8 玉符河重点渗漏带渗水试验过程曲线

Fig. 8 Curve of infiltration test process in major leakage zones of the Yufu river (a. Quaternary; b. borehole)

分区开展生态保护与修复措施。

(1) 重点渗漏带生态补水工程

玉符河重点渗漏带的上游为卧虎山水库、锦绣川水库, 目前已完成引调黄河水、长江水工程建设, 目前正在实施卧虎山至锦绣川的水系连通工程建设, 实现当地地表水、长江水、黄河水的互连互通。因此, 可根据泉流量变化, 在枯水季或泉水位持续下降时, 通过卧虎山水库放水直接向玉符河重点渗漏带进行生态补水, 充分发挥重点渗漏带的渗漏补水功能, 将地表水转变为岩溶地下水, 抬升区域地下水位。

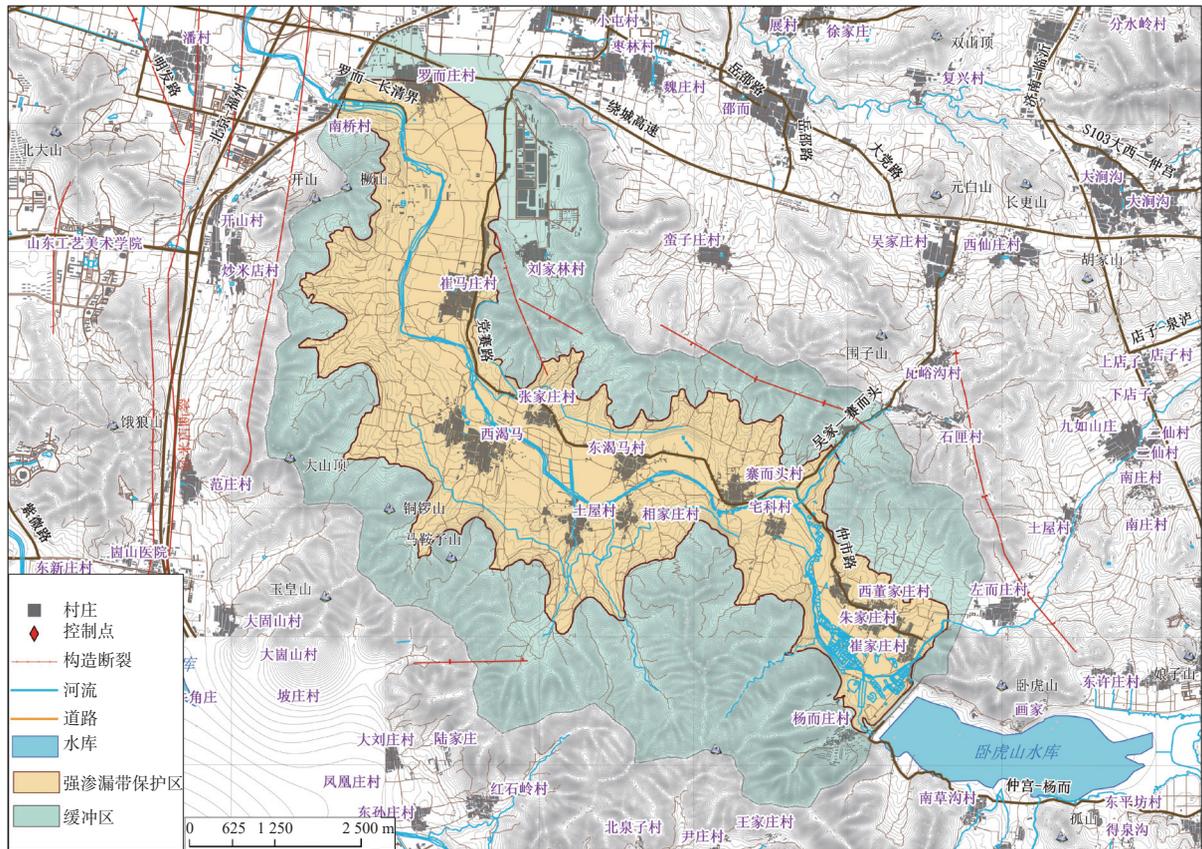


图 9 玉符河重点渗漏带保护区划分成果

Fig. 9 Delimitation of protection areas of major leakage zones along the Yufu river

在生态补水的同时,要做好补水量、地下水水位观测,分析对市区泉群水量、水位、水质的影响。

(2) 拦蓄促参与水源涵养工程

以小流域为单元,针对功能区特点,在重点渗漏保护区主河道内分区采取工程与非工程措施进行治理,设计梯级拦蓄,延长蓄水时间,增大渗漏补水量;利用河流上游水库工程,根据需要调节补水时间,适时对河道进行生态补源;在重点渗漏带缓冲区做好水土保持、涵养水源,保护良好的岩溶地下水环境^[21-22]。

(3) 入河污染控制与水质提升工程

玉符河重点渗漏带主河道两侧沿岸村庄分散,存在居民建设占用河道、河漫滩以及河漫滩种植农作物等情况,有生活污水、生活垃圾、农业面源污染的风险,应重点实施渗漏带及其流域范围内污染源综合整治,完善废物资源化、生活垃圾收集和转运系统,加快生活垃圾收集系统和无害化处理设施建设,禁止向河道内直接排放生活污水与工业废水;对畜禽养殖场及企业生活区进行搬迁,推行农业清洁生

产,避免造成面源污染。

(4) 加强法律法规层面的立法保护

强渗漏带及其流域作为泉域的重要补给区,对泉水的持续喷涌具有重要作用,应结合现有的水资源保护、水污染防治、名泉保护规划、名泉保护条例等相关法律法规,从法律法规层面依法保护重点渗漏带及其流域的生态功能,禁止开发建设重点渗漏带。

5 结论与建议

(1) 玉符河重点渗漏带的生态补水主要是通过提升西郊区域岩溶地下水水位,阻止趵突泉南部山区由南向北径流向西分流,使由南向北径流集中向泉汇聚,从而提升趵突泉水位和涌水量,因此增加玉符河重点渗漏带的入渗补给量,对维持城区泉群水位和喷涌发挥重要作用;

(2) 玉符河重点渗漏带多年平均地下水补给量为 1290.36 万 m^3 ,是岩溶地下水的重要补给来源,可通过调水补源、河道生态修复、入河污染控制等措施,保障玉符河重点渗漏带区域生态环境与岩溶地

下水的补水功能;

(3) 济南趵突泉群仍面临枯水季泉水位和泉涌量双降的困境。济南城区南部(千佛山至趵突泉)径流是趵突泉水位和喷涌的主要来源,西郊和东郊水位变化调控由南向北径流的路径和涌水量分配。当前情况下,除玉符河防水补源外,应对南部重点渗漏带开展调水补给试验和泉水响应观测与分析,为保护泉水提供新的调控空间。

参考文献

- [1] 宋剑英, 王建龙, 赵梦圆, 宫永伟, 李俊奇. 海绵城市建设促渗保泉方案及其效果评估: 以济南市海绵城市建设试点区为例[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 20-26.
SONG Jianying, WANG Jianlong, ZHAO Mengyuan, GONG Yongwei, LI Junqi. Evaluation of sponge city for the spring protection via improving groundwater recharge capacity: A case study of sponge city development in Jinan[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5): 20-26.
- [2] 徐衍兰, 高宗军, 李佳佳. PHREEQC在济南泉水来源判别中的应用与效果[J]. 地下水, 2015, 37(1): 4-5.
XU Yanlan, GAO Zongjun, LI Jiajia. Application and effects of PHREEQC in the source of Ji'nan Spring catchment[J]. Ground Water, 2015, 37(1): 4-5.
- [3] 汪洋, 李娟, 席北斗, 姬永红, 唐军, 刘剑聪, 崔亚莉. 基于数值模拟的岩溶地下水源保护区划分技术研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 799-809.
WANG Yang, LI Juan, XI Beidou, JI Yonghong, TANG Jun, LIU Jiancong, CUI Yali. Research on the division technology of karst groundwater source protection area based on numerical simulation[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(6): 799-809.
- [4] 管清花, 李福林, 王爱芹, 冯平, 田婵娟, 陈学群, 刘丹. 济南市岩溶泉域地下水化学特征与水环境演化[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 653-662.
GUAN Qinghua, LI Fulin, WANG Aiqin, FENG Ping, TIAN Chanjuan, CHEN Xuequn, LIU Dan. Hydrochemistry characteristics and evolution of karst spring groundwater system in Jinan[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 653-662.
- [5] 万利勤. 济南泉域岩溶地下水的示踪研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
WAN Liqin. Tracing study of karst groundwater in Jinan spring area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- [6] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 363-380.
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in Northern China[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 363-380.
- [7] 陈学群, 刘彩虹, 管清花, 田婵娟, 李成光, 辛光明. 趵突泉泉域洼地型强渗漏带特征及保护措施[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 60-64.
CHEN Xuequn, LIU Caihong, GUAN Qinghua, TIAN Chanjuan, LI Chengguang, XIN Guangming. Characteristics and protection measures of depression type strong seepage zone in Baotu Spring area[J]. Yellow River, 2020, 42(4): 60-64.
- [8] 李传生, 祁晓凡, 王雨山, 安永会, 邢立亭. 我国北方典型岩溶地下水对降水及气象指数的响应特征: 以鲁中地区为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 643-652.
LI Chuansheng, QI Xiaofan, WANG Yushan, AN Yonghui, XING Liting. Response characteristics of typical karst groundwater levels of central Shandong Province to precipitation and climatic index[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 643-652.
- [9] 杜新强, 贾思达, 方敏, 冶雪艳. 海绵城市建设对区域地下水资源的补给效应[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 13-17, 24.
DU Xinqiang, JIA Sida, FANG Min, YE Xueyan. Recharge effect of sponge city construction on regional groundwater resources[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 13-17, 24.
- [10] 刘玲, 王良学, 栾新杰. 济南市海绵城市建设与兴隆流域治理措施研究[J]. 水利规划与设计, 2017(8): 40-42.
LIU Ling, WANG Liangxue, LUAN Xinjie. Research on the construction of sponge city in Jinan and the measures for the management of Xinglong river basin[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(8): 40-42.
- [11] 孟庆斌, 邢立亭, 滕朝霞. 济南泉域“三水”转化与泉水恢复关系研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2008(5): 82-87.
MENG Qingbin, XING Liting, TENG Zhaoxia. The relationship of spring protection and transformation pattern between precipitation groundwater and surface water in the Jinan spring region[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008(5): 82-87.
- [12] 刘彩虹, 陈学群, 田婵娟, 辛光明, 管清花, 李成光. 小岭村改造项目对济南泉域小岭强渗漏带的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 40-45.
LIU Caihong, CHEN Xuequn, TIAN Chanjuan, XIN Guangming, GUAN Qinghua, LI Chengguang. Impacts of Xiaoling Urban Village Renovation Project on leakage zone of Baotu Spring area, Jinan[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 40-45.
- [13] 邢立亭. 济南泉域岩溶地下水开发布局研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 46-47.
XING Liting. Study on the development and layout of karst groundwater in Jinan spring area[J]. Yellow River, 2007, 29(2): 46-47.
- [14] 王迪迪. 济南市回灌保泉方案安全评价体系研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
WANG Didi. Study on safety evaluation system for "Recharge Spring Protection" program in Jinan[D]. Jinan: Shandong University (Jinan), 2014.

- [15] 魏建国, 张爱军, 蔡建波. 核心竞争力视域下济南市泉水保护机制研究[J]. *山东农业工程学院学报*, 2017, 34(11): 87-92.
WEI Jianguo, ZHANG Aijun, CAI Jianbo. A Study on the mechanism of the spring protection in Jinan in the core competitiveness perspective[J]. *The Journal of Shandong Agriculture and Engineering University*, 2017, 34(11): 87-92.
- [16] 于欣沛, 张慧, 张腾戈. 基于遥感技术的土地利用/土地覆盖的研究综述[C]. 中国环境科学学会. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集, 2015: 1814-1819.
YU Xinpei, ZHANG Hui, ZHANG Tengge. Review of research on land use/land cover based on remote sensing technology[C]. Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of 2015 Academic Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences, 2015:1814-1819.
- [17] 黄凯, 杨飞. 浅析野外渗水试验及其渗透系数的计算[J]. *河南科技*, 2013(22): 191-192.
HUANG Kai, YANG Fei. Analysis of infiltration test in the field and calculation of its permeability coefficient[J]. *Journal of Henan Science and Technology*, 2013(22): 191-192.
- [18] 王东玥. 海绵城市在济南促渗保泉中的应用[J]. *城市建设理论*(电子版), 2018(20): 185-186.
WANG Dongyue. Application of sponge city in promoting infiltration and protecting springs in Jinan[J]. *Theoretical Research in Urban Construction (Electronic Edition)*, 2018(20): 185-186.
- [19] 李道真. 山丘区三水转化及应用变参进行区域水资源计算方法研究(上)[J]. *中国人口资源与环境*, 1989(1): 44-49.
LI Daozhen. Study on calculating method of variable parameters in areal water resource evaluation and the interaction between surface water and groundwater[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 1989(1): 44-49.
- [20] 李道真. 山丘区三水转化及应用变参进行区域水资源计算方法研究(下)[J]. *中国人口资源与环境*, 1990(1): 36-44.
LI Daozhen. Study on calculating method of variable parameters in areal water resource evaluation and the interaction between surface water and groundwater[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 1990(1): 36-44.
- [21] 王红. 水土保持典型措施对地下水补给生态基流的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
WANG Hong. Study on the influence of typical measures of soil and water conservation on ecological base flow of groundwater recharge[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [22] 王敏. 济南市南部山区水环境现状评价及保护性开发影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2002.
WANG Min. Evaluation of water environment in southern mountain area of Jinan City and study on the impact of protective development[D]. Jinan: Shandong Normal University (Jinan), 2002.

Recharge characteristics and protection of karst groundwater in major leakage area of Yufu river in Jinan

GUAN Qinghua^{1,2}, WANG Yujing³, CHEN Xuequn^{1,2}, ZENG Guihua^{1,2}, XIN Guangming^{1,2}

(1. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China*; 2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan, Shandong 250013, China*; 3. *Jinan Forest Farm, Jinan, Shandong 250002, China*)

Abstract Jinan, called as "the city of thousands of springs", is famous for its large number of springs. The saying "the seventy-two famous springs in Jinan top those elsewhere" reflects a profound spring culture with a long history. Therefore, spring water conservation and research are very important. However, in Baotu Spring Group, the reduction of water level and spring flow in the dry season have to be faced with . The direct recharge area and the major leakage zone in the region of Baotu Spring are important recharge areas for karst groundwater. Especially, the major leakage zone is an important supply channel for spring water. As a natural river leakage zone with a large watershed area and better inflow conditions, the Yufu river is one of the major leakage zones in the region of Baotu Spring. Besides, by increasing the water replenishment capacity of major leakage zones with external water replenishment, the water system connection project of Wohushan Reservoir and Jinxiucheng Reservoir can transport and replenish water to the Yufu river.

Taking the main river as a research focus, we delimited the protection range of the major leakage zone of the Yufu river. In order to finish the delimitation, we analyzed the water replenishment function of leakage and adopted the techniques such as RS, GPS, GS, geophysical surveys and hydrogeological tests and LSDPV method. Meanwhile, the calculation by the method of variation parameters shows that the average recharge of nature groundwater in the major leakage zone of the Yufu river has reached 12.90 million m³ for recent years, becoming an important recharge source for karst groundwater. The water replenishment effect in the major leakage zone of the Yufu river has been achieved

mainly by raising the karst groundwater level in the western area so as to prevent the westward diversion of groundwater in the northern runoff process in the southern mountainous area of Baotu Spring. In this process, the groundwater is concentrated in the spring outcropping area, and hence the spring discharge may increase. On the condition of protecting the nature infiltration of leakage zone, we can fully explore the water replenishment function and increase the replenishment of major leakage zones of the Yufu river by water diversion, ecological restoration and pollution control. The research finding shows that delimiting major protection areas for leakage zones is important for us to ensure the continuous gushing of springs. This study also provides a basis for the accurate and scientific protection of springs as well as technical support for urban development planning and protection of the famous springs in Jinan.

Key words the region of Baotu Spring, major leakage zone, leakage recharge, protection of karst springs

(编辑 黄晨晖)

(上接第 232 页)

unreasonable use of water resources. (2) Transporting sewage channels, pipelines and oil pipelines through protection area of water source should be prohibited. (3) The construction of oil depots in protection areas should be prohibited. (4) The government and institution should gradually improve the irrigation system in agriculture, and actively introduce new technologies and techniques to save water. (5) The government and related institutions should heighten citizens' awareness of water conservation and water resources protection, and promote standardized water resources management.

Key words karst area, groundwater, water quality evaluation, hydrochemical analysis, fuzzy evaluation

(编辑 张玲)