

刘玉想, 卢茜茜, 刘媛媛, 等. 章丘百脉泉群核心出露区水文地质特征及敏感保护区划分[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 1027-1036.

DOI: 10.11932/karst20230511

章丘百脉泉群核心出露区水文地质特征及敏感保护区划分

刘玉想^{1,2}, 卢茜茜^{1,2}, 刘媛媛³, 王少娟^{1,2}, 丁冠涛^{1,2}, 韩 昱^{1,2}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队(山东省地矿工程勘察院), 山东 济南 250014;

2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014;

3. 山东理工职业学院, 山东 济宁 272067)

摘 要: 为了查清章丘百脉泉出露区浅部微观地质条件及其与泉水的关系, 通过物探、钻探、水位观测等多种手段, 查明断裂构造发育特征, 刻画泉水出露区浅部地层结构, 分析出露区泉水喷涌主要影响因素, 划分敏感保护区范围。结果表明: 出露区断裂构造极为发育, 共发育 5 条断层、1 个破碎带, 为岩溶水上涌提供了通道; 卵砾石层在断裂两侧普遍发育, 呈现中间厚向两侧变薄并逐渐尖灭的特征, 卵砾石层为泉水上涌后提供了赋存空间, 在埋藏较浅处涌出成泉。出露区影响泉水喷涌的主要因素为断裂构造的控制作用和卵砾石层的连通、透水作用。综合断裂构造和卵砾石层的发育厚度划分了敏感区和较敏感区, 面积分别为 0.78 km² 和 0.67 km²。

关键词: 百脉泉群; 泉群出露区; 开发建设; 泉水保护; 储水构造

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)05-1027-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

章丘为济南市所辖的县级区, 以泉水资源丰富而著称。城区群泉汇集, 风景秀丽, 素有“小泉城”之美誉。出露在城区中心东麻湾内的百脉泉以其“西则趵突为魁, 东则百脉为冠”的气势荣入济南 72 名泉之列, 不但美化了城市环境, 支撑旅游产业, 更为当地农田灌溉、城市工业及居民生活用水提供了可靠而清洁的水源。

然而, 21 世纪以来, 随着城市建设快速发展, 工农业用水量大量增加, 泉群多次出现断流现象, 尤其是 2001 年 3 月 21 日—2003 年 9 月 16 日, 明水泉群

连续断流 909 d^[1]。为维持泉水喷涌, 政府相关部门实施了地质保泉、关井保泉、调水保泉、节蓄保泉等一系列措施, 减少了泉群附近的岩溶水开采量, 一定程度上保护了泉水。多年来许多学者在泉水成因、断流与保护方面也做了大量研究^[2-5], 如于翠翠应用 GMS 建立了明水泉域的三维地下水流数值模拟模型, 对泉水位动态进行了预测; 袁传芳等从泉水成因分析了采煤与保泉的关系; 崔爱萍采用数学统计方法研究泉水影响因素与泉水动态的定量关系, 等等。以往的研究多针对于宏观的整个泉域, 而具体针对泉群核心出露区微观地质特征的研究反而较少。泉水核心出露区即泉群出露最集中的地段, 指的是东

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272288)

第一作者简介: 刘玉想(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质研究工作。E-mail: 531396099@qq.com。

通信作者: 王少娟(1976—), 女, 研究员, 主要从事水文地质、环境地质研究工作。E-mail: 119559390@qq.com。

收稿日期: 2023-04-20

西麻湾的分布范围,共有 16 处泉水出露,是最应重点保护的地方。在当前泉群核心出露区拟开发建设的背景下,迫切需要查清核心出露区浅部微观地层结构及与泉水的关系,识别敏感区范围,为工程建设规避泉水提供重要依据。

本文在泉水核心出露区以往供水勘探等资料基础上,采用物探、钻探、水位观测等多种方法,系统研究泉水出露区微观地层结构特征、构造发育特征,分析泉水喷涌的主要影响因素,划分敏感保护区范围,以期为泉群出露区开发建设时的泉水保护工作提供依据。

1 研究区概况

百脉泉泉域位于章丘东南部山区,以及淄博市周村区、博山市西部。泉域边界西为文祖断裂、东至禹王山断裂、南以变质岩及下寒武统朱砂洞组底板为界、北以奥陶系灰岩顶板埋深 600 m 线为界^[6],面积 660 km²。泉域由南向北出露的地层依次为新太古代变质岩,古生界的寒武系、奥陶系灰岩、白云岩夹页岩,石炭系一二叠系砂页岩夹煤层,新生界新近系和第四系松散堆积物。泉域属小清河水系^[7],区内主要河流为青杨河及巴漏河。

泉域地下水类型可以分为松散岩类孔隙水、碎屑岩夹碳酸盐岩类岩溶裂隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水、碳酸盐岩夹碎屑岩类岩溶裂隙水和块状岩类风化裂隙水共五类(图 1)。泉域岩溶地下水径流总体方向为由南向北,在北部径流排泄区分布有多个岩溶地下水水源地,受其开采影响,岩溶地下水会形成局部水位降落漏斗,导致周边岩溶水向开采漏斗方向径流。泉群出露区主要位于泉域西北角老城区内,泉水主要来源于南部岩溶区,大气降水及地表径流入渗形成了丰富的裂隙岩溶水。这部分裂隙岩溶水沿岩层倾斜方向自南向北流动,至章丘城区北部泉域最低洼地段受煤系地层阻挡后,沿断裂构造冲破薄弱隔水层上涌成泉^[8]。

泉群的形成原因包括 5 个方面,分别为良好的储水构造,相对隔水岩层的阻挡,条件适宜的地形、地貌,断裂构造的控制作用^[9]以及卵砾石层连通、透水作用(图 2)。禹王山断裂和文祖断裂为东西两侧隔水边界,南部以变质岩系为界,向北古生界寒武、奥陶系地层依次排列,构成单斜断快蓄水构造,地下

水由南向北径流,受煤系地层阻挡后,向章丘老城区附近汇集,在东麻湾和西麻湾等地势最低洼处,沿断裂构造冲破薄弱隔水层上升至卵砾石层储存,在卵砾石层埋藏较浅或出露地表处呈面状喷涌,形成泉水。

2 研究方法

本次研究先后开展了水文地质调查、地球物理勘探、地质钻探、岩溶水位统测、工程测量、综合研究等多项工作。水文地质调查比例尺为 1:5 000,主要调查废弃的机民井、原有的勘探孔、现施工的堵漏孔及泉水,共计 16 个点,调查面积 4.50 km²;地球物理勘探采用高密度电法和可控源音频大地电磁测量(V8)两种方法,剖面长度 9.6 km;地质钻探施工 6 个浅孔,单孔 20 m 共 120 m;岩溶水位统测共计 18 点次;工程测量包括坐标和高程测量,共 22 个点。具体部署见图 3。

3 结果与讨论

3.1 泉群出露区构造发育特征

在岩溶发育区,断裂构造对地下水径流和富集具有一定的控制作用^[10]。以往地质资料显示泉群核心出露区至少有三条较大断裂穿过,自西向东分别为砚池断裂、明水断裂及绣水断裂,泉水大都沿这些断裂破碎带分布,如砚池断裂一带的净明泉、眼明泉、虎踞泉,和明水断裂一带的百脉泉、墨泉、龙泉等。

出露区东部物探解疑存在 3 条构造和 1 条破碎带(表 1),其中 F2,走向 NW,倾向 SW,为原明水断裂;F3 断裂,走向 NW,倾向 SW,为明水断裂次级构造;F4 断裂,走向 NW,倾向 NE,为次级构造;破碎带位于 F2 与 F3 之间,走向 NW,倾向 NE。物探解疑的断裂构造均为导水断裂,其破碎带及影响带低阻反应明显,地下水在此处富集,为岩溶地下水的主要径流通道。

综合物探解疑成果及以往认识,出露区内自西向东依次发育砚池断裂、明水断裂(F2)、次级断裂 F3、次级断裂 F4 及绣水断裂共 5 条(图 4)。整个出露区断裂构造极为发育,受断裂构造影响,岩石破碎,为岩溶地下水提供了上涌及运移通道。泉水分布与构造发育密切相关,西麻湾泉群主要受砚池断裂控制,泉水基本沿砚池断裂两侧分布;东麻湾泉群基本

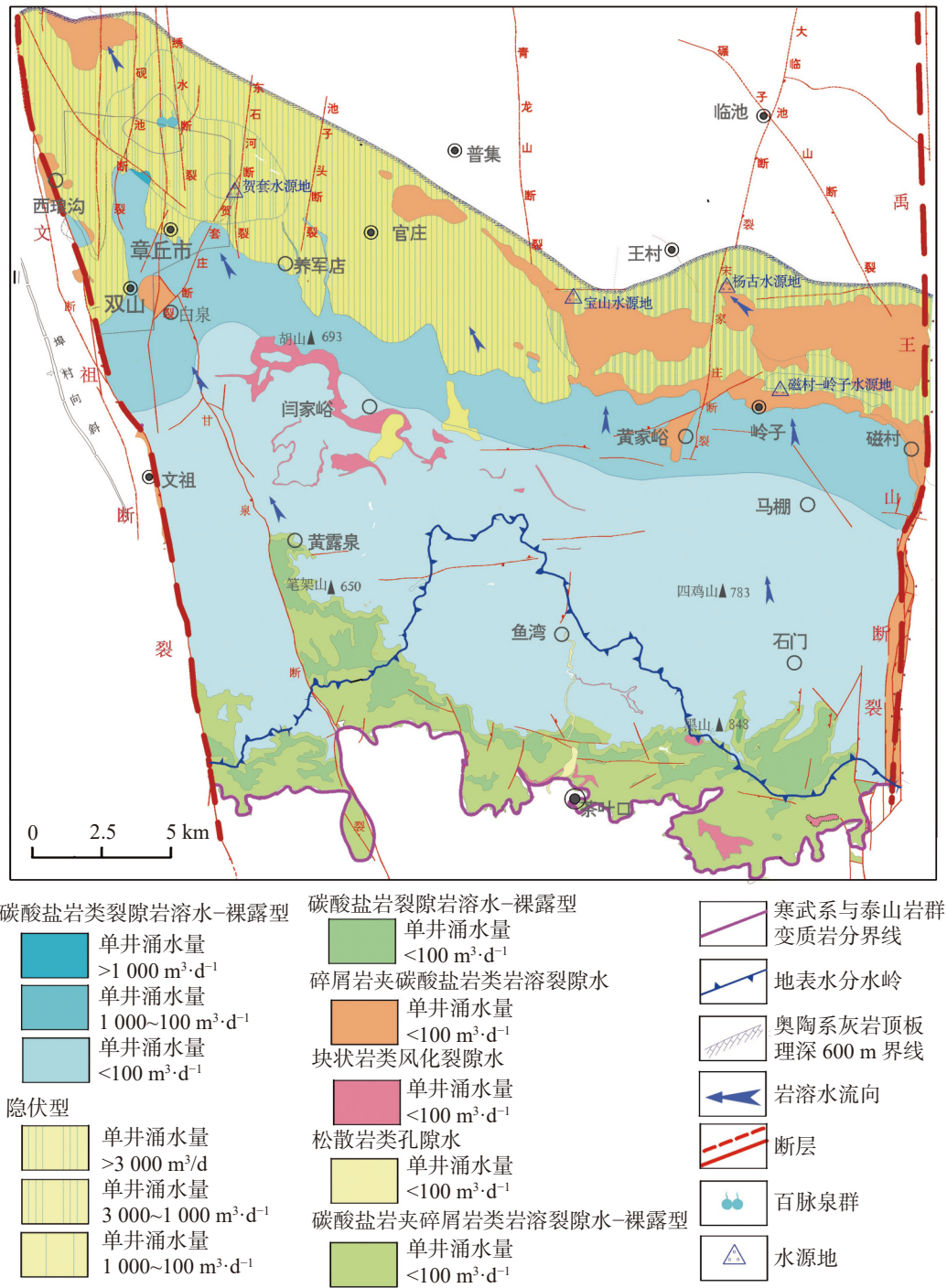


图 1 百脉泉泉域水文地质略图

Fig. 1 Hydrogeological sketch of Baimai spring area

沿明水断裂的次级断裂 F3 分布。

3.2 出露区第四系及卵砾石层发育特征

第四系及卵砾石层在百脉泉群出露区广泛分布，第四系厚 5~20 m，卵砾石层厚 0~13 m，富水性较强，东麻湾及绣江河一带厚度较大、埋藏浅，岩溶水通过断裂导水通道上升至该卵砾石层，形成密切的水力

联系，在卵砾石层埋藏较浅或出露地表处呈面状喷涌，形成百脉泉及东麻湾诸多泉眼。

3.2.1 垂向发育特征

根据钻孔揭露，泉群出露区地层自上而下依次为：第四系、石炭二叠系和奥陶系。其中第四系岩性自上而下一般又分为填土、粉质黏土和卵砾石层

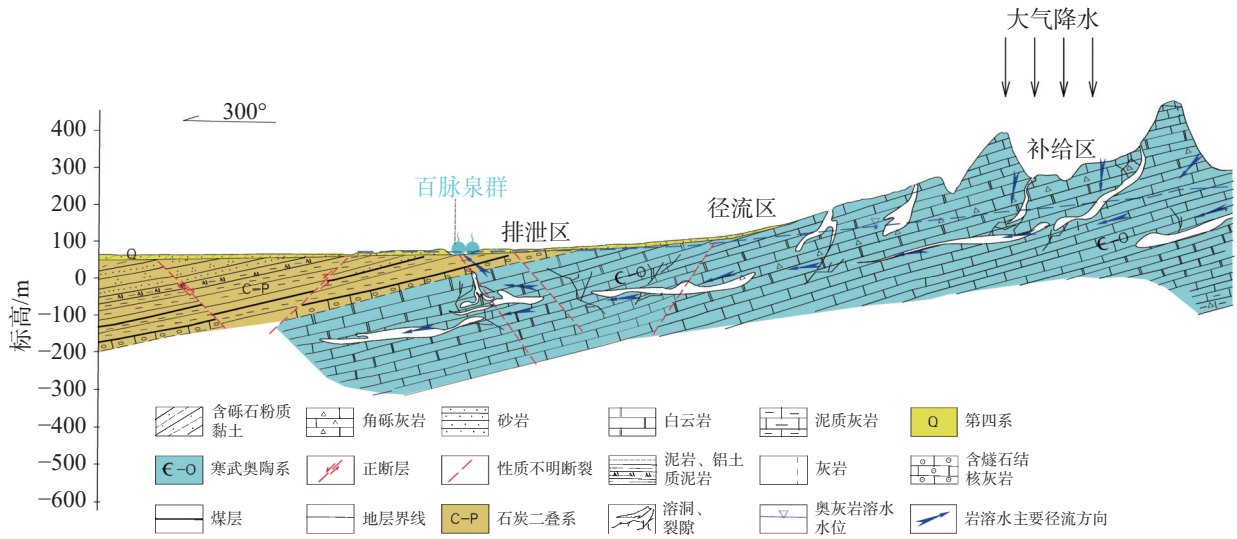


图 2 泉水成因示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spring origin

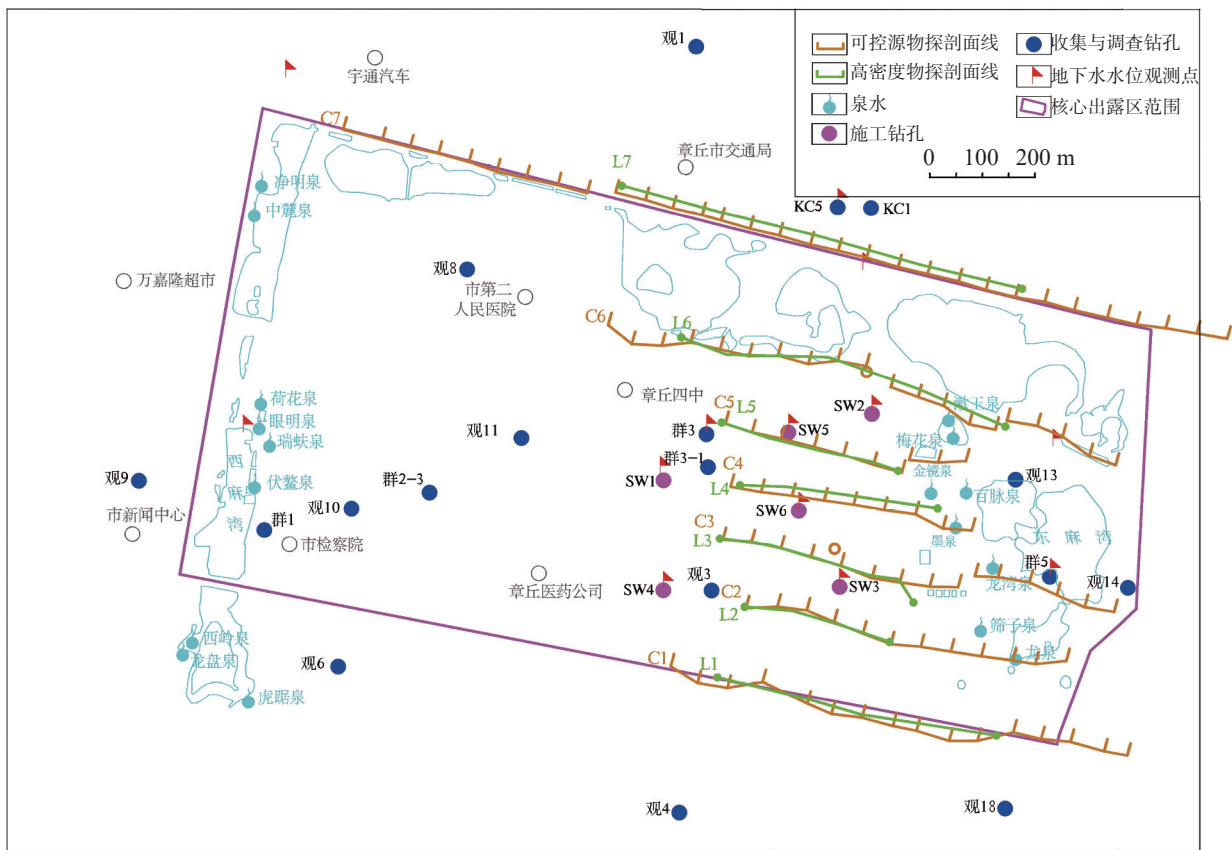


图 3 工作部署图

Fig. 3 Work deployment diagram

(图 5)。

(1) 填土主要成分以混凝土碎块、碎石块、碎砖块为主, 混少量粉质黏土。场区内普遍分布, 厚 1.00~9.00 m。

(2) 粉质黏土呈黄棕色、黄褐色, 含铁锰氧化物及少量姜石。场区内局部地段分布, 厚 0~8.50 m。

(3) 卵砾石呈灰色, 大小不均匀, 直径一般为 1~4 cm, 含量约 60%~70%, 磨圆度次圆状, 粉质黏土

表 1 物探解疑构造及破碎带

Table 1 Geophysical exploration and interpretation of structures and fractured zones

推测构造或破碎带	走向	倾向	倾角	发育规模	备注
F2	350°	SW	80°	发育深度910 m, 宽度150 m左右, 垂直断距50 m	与明水断裂属同一条
F3	355°	SW	80°	发育深度930 m, 北部宽度100 m左右, 南部宽度可达150 m, 断距约20 m	新解疑次级断裂
F4	345°	NE	75°	工作区内发育880 m, 垂直断距50 m	新解疑次级断裂
破碎带	北西	NE		面积约41 380 m ²	新解疑破碎带

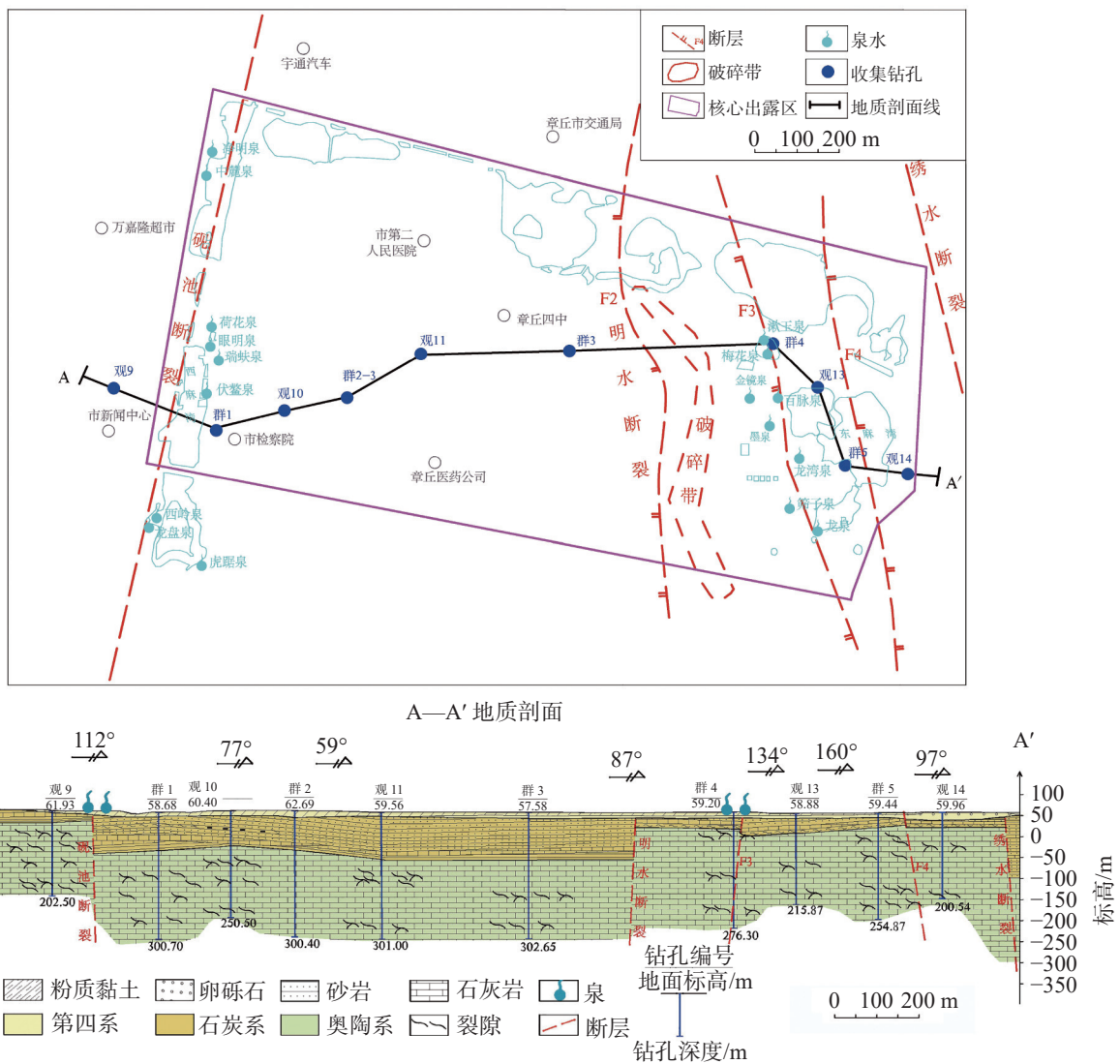


图 4 物探解疑断成果及地质剖面图

Fig. 4 Results of geophysical prospecting and geological profile

充填, 局部钙质胶结。场区内局部分布, 厚 0~13 m, 下部与石炭二叠系直接接触。

3.2.2 平面发育特征

共搜集整理 26 个勘探钻孔资料, 绘制出露区第

四系厚度等值线及卵砾石层厚度等值线(图 6)。

(1)由图 6 可以看出, 第四系出露于东麻湾地段, 厚度等值线的展布方向大体与 F2(明水断裂)、F4 断裂走向一致, 以 F2 与 F4 之间区域最厚, 一般大于 10 m, 最厚达 20 多米, 向两侧逐渐变薄。断裂带以

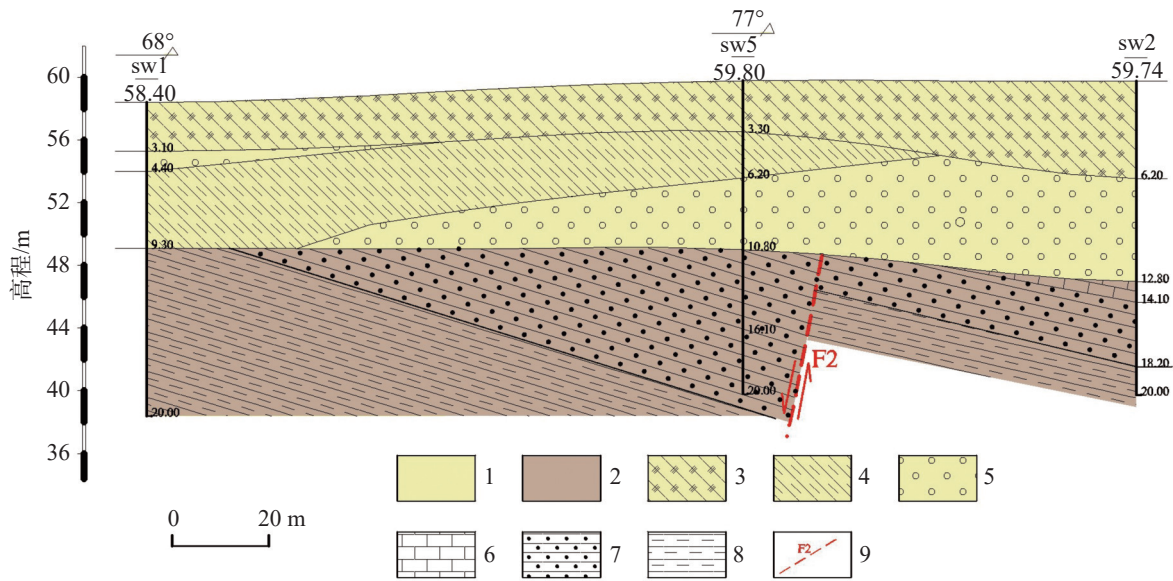


图 5 百脉泉泉群出露区浅部地层结构剖面图

1-第四系 2-石炭二叠系 3-填土 4-粉质黏土 5-卵砾石 6-灰岩 7-砂岩 8-泥岩 9-断裂

Fig. 5 Profile of shallow stratigraphic structure in the exposed area of Baimai spring group

1- Quaternary system 2- Permo-Carboniferous system 3- Filled earth 4- Silty clay 5- Gravel 6- Limestone 7- Sandstone 8- Mudstone 9- Fracture

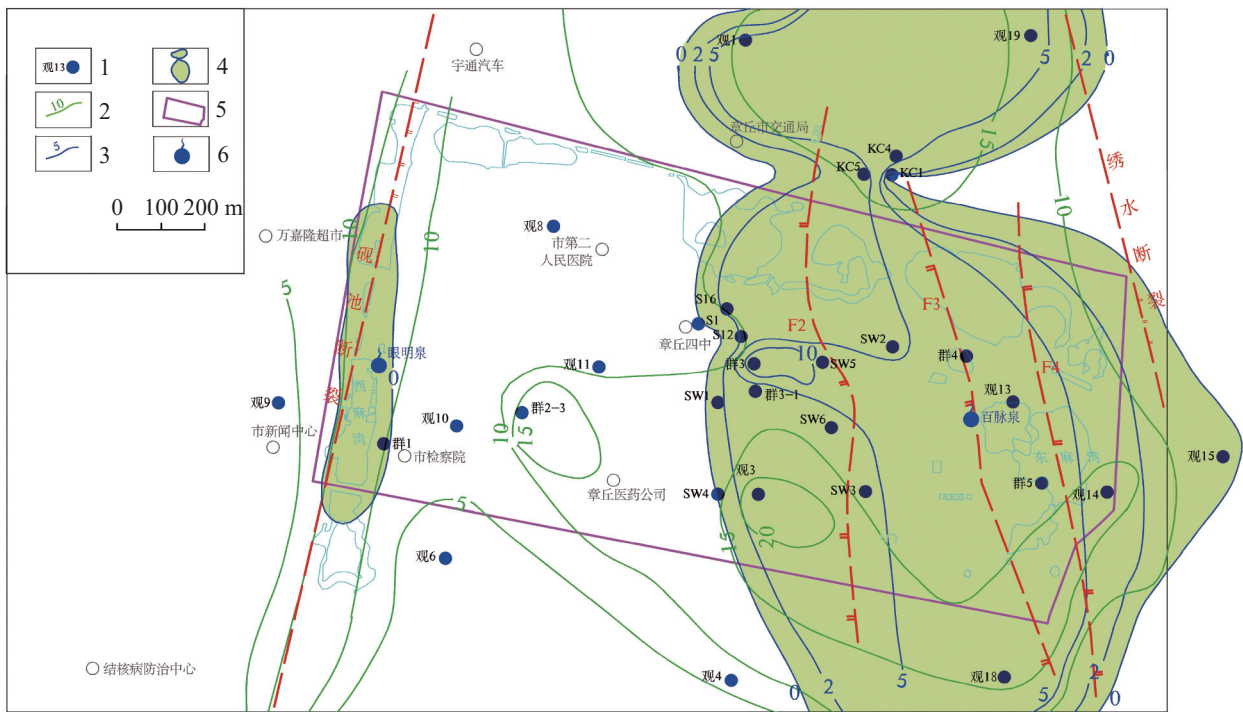


图 6 百脉泉泉群出露区第四系及卵砾石层分布图

1-控制点 2-第四系厚度等值线 3-卵砾石层厚度等值线 4-卵砾石层分布区 5-泉群出露区 6-泉水

Fig. 6 Distribution of Quaternary and gravel layer in the exposed area of Baimai spring group

1- Controlling point 2- Quaternary thickness contour 3- Contour of gravel layer thickness 4- Distribution zone of gravel layer 5- The exposed area of spring group 6- Spring water

外的出露区一般在 5~10 m 之间;西麻湾一带第四系厚度以砚池断裂附近最厚,在 10 m 左右,向两侧逐渐变薄,一般为 2~10 m。第四系的厚度与断裂带的

发育程度紧密相关,这是由于断裂附近地层破碎,常年被流水冲刷侵蚀沉积而成,所以厚度最大。

(2)卵砾石层出露区仅在东麻湾一带分布较广,

局部为半胶结的砾石,卵砾石层厚度等值线展布方向与F2、F3断裂走向一致,在F1至绣水断裂之间厚度最大,一般大于5 m,局部厚度大于10 m。向两侧逐渐变薄,在S1孔以西、观15孔以东的区域卵砾石层缺失。推断0 m厚的卵砾石层等值线圈定的区域呈椭圆型南北展布,从S1孔至观15孔均有卵砾石层分布,在北部KC1孔处最窄,向北又变宽,0 m厚的卵砾石层等值线圈定的面积约1.46 km²。

根据掌握资料,西麻湾一带仅群1孔揭露了卵砾石层,厚度仅1 m,两侧的观9和观10均没有揭露,该地段卵砾石层分布较少,大体沿砚池断裂在两侧少量分布,推断面积约0.08 km²,出露区内为0.07 km²。

3.2.3 卵砾石层孔隙水与奥灰水水力联系分析

根据前述的地质条件,出露区内卵砾石层与下伏二叠石炭系基岩直接接触,区内断裂构造发育,构造切割了二叠石炭系隔水层,使岩溶水与卵砾石层孔隙水通过断裂构造带连通,承压的岩溶水会沿断裂构造上涌进入卵砾石层赋存,两者之间水力联系非常密切,卵砾石层就成为了岩溶水的“天窗”。根据2018年出露区地下水水位统测数据,孔隙水水位标高55.68~55.71 m,泉水及岩溶水水位标高55.78~55.88 m,岩溶水与孔隙水水位非常接近,稍高于孔隙水10 cm左右,证明了两之间水力联系密切,岩溶水顶托补给孔隙水。

3.3 敏感保护区划分及保护

敏感保护区是指泉水受外界因素影响后会产生一定反应的区域,根据反应程度可划分为敏感区和较敏感区,敏感区反应最强烈,较敏感区相对减弱。

根据前面分析,出露区内断裂构造非常发育,沿断裂构造及破碎带为岩溶地下水的主径流通道,也是泉水上涌的主要通道。断裂带两侧卵砾石层普遍发育,垂向上与基岩直接接触,形成“天窗”,为岩溶地下水提供了浅部的赋存空间,在厚度较大埋藏较浅处就会形成泉水。因此,在泉群出露区影响泉水出流的主要因素为断裂构造的控制作用和卵砾石层的连通、透水作用,断裂构造发育程度与卵砾石层分布的范围、厚度决定了保护区的敏感程度。卵砾石层及断裂构造的发育区就是出露区开发过程中重点的保护对象,也是敏感保护区划分的主要依据。

综合分析断裂构造及卵砾石层的发育程度,将

出露区内断裂构造发育强烈且第四系卵砾石层发育的区域划分为敏感保护区;出露区内断裂构造发育相对较弱且卵砾石层不发育的区域划为较敏感保护区(图7)。

3.3.1 敏感保护区

敏感保护区位于老四中操场以东至环湖东路(出露区东边界)的大部分区域以及沿西麻湾少量区域,面积约0.78 km²。区内断裂构造非常发育。第四系较厚,一般在12 m左右,卵砾石层发育厚度也较大,中心地带厚度达到6~7 m,向两侧逐渐变薄至尖灭。开发建设时基坑开挖易揭露破坏卵砾石层,由于其富水性较好,排水施工会导致岩溶地下水排泄,进而影响百脉泉群的出流量及喷涌时间;若采用封堵方式,则会造成泉水径流通道的堵塞,影响现有泉水喷涌甚至会断流消失。因此,区内一般不适宜开挖基坑的地下工程建设。

3.3.2 较敏感保护区

较敏感区主要为章丘老四中以西、砚池断裂以东的大部分区域,面积约0.67 km²。区内断裂构造发育程度相对弱一些。第四系厚度相对较薄,一般10 m左右,南部相对较薄,局部<5 m,全区卵砾石层不发育。开发建设时,若基坑开挖揭露破碎基岩时则会进行排水降低水位,如果大量排水会影响百脉泉群的喷涌量,缩短泉水的喷涌时间,如果封堵,则会造成泉水径流通道的堵塞,同样影响泉水喷涌甚至会断流消失。较敏感区内进行工程建设时,基坑开挖深度不能过大,具体可开挖深度应进行更详细的勘查后确定。

3.3.3 保护措施

除做好地下工程开发建设时的保护措施外,泉水核心出露区的地面以上也需做好水量、水质等的保护工作,包括:禁止建设影响泉水出流及有碍名泉风貌的建(构)筑物;禁止污水、废水向泉水排放;禁止新开凿岩溶水井,以及挖泉、截流和引水;关停核心出露区附近地下水水源地,封存地下水自备井,限制岩溶地下水的开采^[1]等。在泉水的补给区内保护工作同样重要,应当加快植树造林,封山育林、育草,保护植被,涵养水源;限制与泉水保护无关的建(构)筑物或开发项目建设,避免补给区地面硬化减少补给量;禁止倾倒、堆放、填埋城市生活垃圾、建筑垃

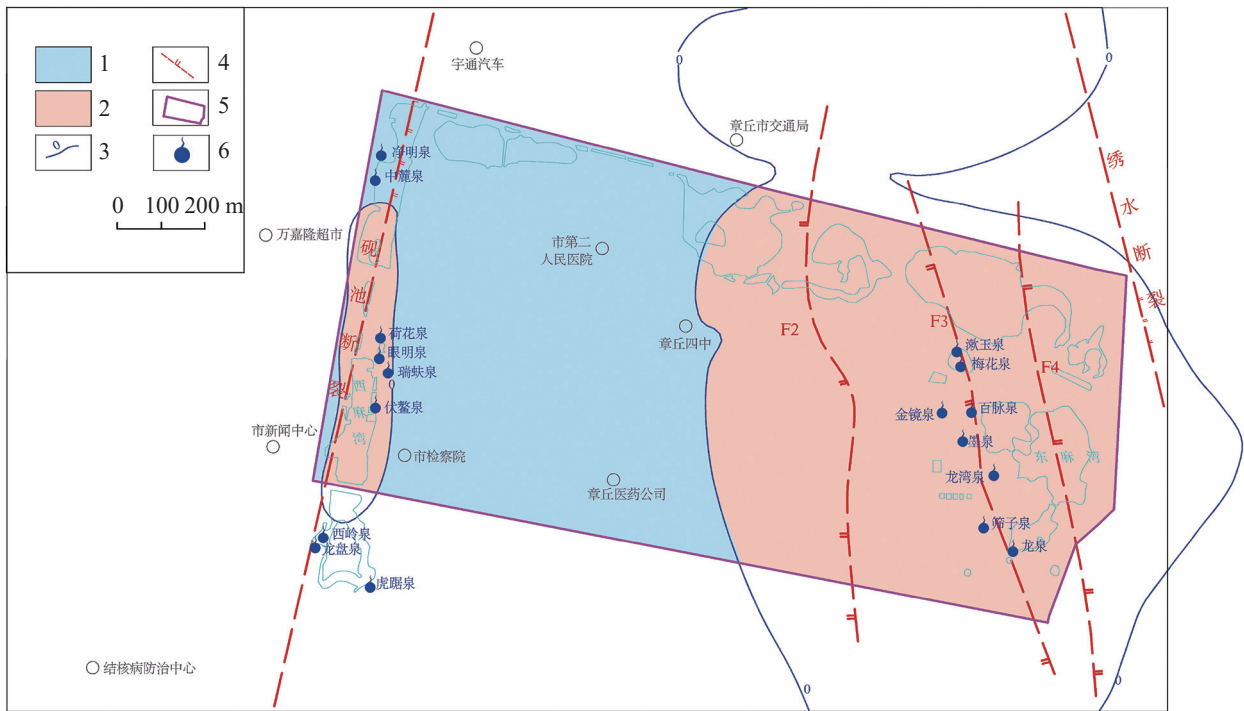


图 7 敏感保护区划分图

1-较敏感保护区 2-敏感保护区 3-0 m 卵砾石层厚度等值线 4-断层 5-泉群核心出露区 6-泉水

Fig. 7 Delimitation of sensitive protection areas

1- Relatively sensitive protection areas 2- Sensitive protection areas 3- Contour of gravel layer thickness at 0 m

4- Fault 5- The core exposed area of spring group 6- Spring water

圾、工业固体废物和危险废物等。

4 结 论

(1)百脉泉泉水成因包括良好的储水构造,相对隔水岩层的阻挡,条件适宜的地形、地貌,断裂构造的控制作用以及卵砾石层的透水作用等 5 个方面。出露区内断裂构造和卵砾石层的发育是控制泉水形成的主要因素。

(2)百脉泉泉群出露区断裂构造极为发育,已发现 5 条构造和 1 条破碎带,沿断裂构造及破碎带为岩溶地下水的主径流通道,也是泉水上涌的主要通道。断裂带两侧卵砾石层普遍发育,展布方向与断裂构造走向基本一致。卵砾石层垂向上与基岩直接接触,通过构造破碎带与岩溶水联系密切,形成岩溶水的“天窗”,为岩溶地下水提供了浅部的赋存空间。

(3)卵砾石层及断裂构造的发育区为开发过程中重点的保护区。依据卵砾石层的分布特征及构造发育情况,将出露区划分为敏感保护区和较敏感保

护区。敏感保护区内一般不适宜进行开挖基坑的工程建设;较敏感保护区内进行工程建设时,基坑开挖深度不能过大,应不能破坏卵砾石层。

参考文献

[1] 袁传芳,刘伟,刘永红,曹元青.影响百脉泉喷涌因素浅析[J].山东水利,2006(9):23-24.

[2] 于翠翠.济南明水泉域岩溶地下水数值模拟及泉水水位动态预测[J].中国岩溶,2017,36(4):533-540.

YU Cuicui. Numerical simulation of karst groundwater and dynamic prediction of spring water level in the Mingshui spring area, Jinan City[J]. Carsologica sinica, 2017, 36(4): 533-540.

[3] 崔爱萍,于翠翠.百脉泉泉群流量动态特征及影响因素分析[J].山东国土资源,2016,32(9):30-35.

CUI Aiping, YU Cuicui. Analysis on dynamic characteristics of discharge and influence factors in Baimai spring group[J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(9): 30-35.

[4] 袁传芳,张运区,逯志强.从明水泉的成因谈采煤与保泉的关系[J].水资源保护,2003(4):10-12.

YUAN Chuanfang, ZHANG Yunqu, LU Zhiqiang. Discussion on the relationship between coal mining and spring protection from the origin of Mingshui spring[J]. Water Resources Protection, 2003(4): 10-12.

[5] 李媛媛,孟宪红,李雅静.百脉泉群断流及明水泉群水资源保

- 护的探讨[J]. 山东环境, 2001(3): 44.
- LI Yuanyuan, MENG Xianhong, LI Yajing. Discussion on water resources protection of Baimai springs group and Mingshui spring group[J]. Shandong Environment, 2001(3): 44.
- [6] 张宝柱, 陈振东. 明水泉岩溶水系统分析[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(1): 52-58.
- ZHANG Baozhu, CHEN Zhendong. The analysis of Mingshui spring karst-water system in Shandong[J]. Journal of Hebei College of Geology, 1996, 19(1): 52-58.
- [7] 刘永红, 郑萍萍, 周明春. 章丘市泉群保护与泉水资源利用工程[J]. 山东水利, 2007(2): 44-45.
- [8] 刘伟, 袁传芳, 胡祖忠. 浅析明水泉的形成与保护[J]. 上海水务, 2005, 21(4): 49-50.
- LIU Wei, YUAN Chuanfang, HU Zuzhong. Analysis of the formation and protection of Mingshui spring[J]. Shanghai Water, 2005, 21(4): 49-50.
- [9] 胡丙忠. 明水泉群成因机理及泉域岩溶地下水数值模拟[D]. 青岛: 山东科技大学, 2012.
- HU Bingzhong. The genetic mechanism of Mingshui spring group and numerical simulation of karst groundwater in spring regions[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2012.
- [10] 韩凯, 梁永平, 严良俊, 梁东辉, 申豪勇, 唐春雷. 综合物探调查晋祠断裂对晋祠泉流域岩溶水控制作用效果分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 745-752.
- HAN Kai, LIANG Yongping, YAN Liangjun, LIANG Donghui, SHEN Haoyong, TANG Chunlei. Control of the Jinci fault on karst water in the Jinci spring basin revealed by integrated geophysical surveys[J]. Carsologica sinica, 2020, 39(5): 745-752.
- [11] 王焰新. 我国北方岩溶泉域生态修复策略研究: 以晋祠泉为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 331-344.
- WANG Yanxin. Study on ecological restoration strategy of karst spring region in North China: Taking Jinci spring as an example[J]. Carsologica sinica, 2022, 41(3): 331-344.

Hydrochemical characteristics and delimitation of sensitive protection area in the exposed area of Baimai spring group in Zhangqiu

LIU Yuxiang^{1,2}, LU Qianqian^{1,2}, LIU Yuanyuan³, WANG Shaojuan^{1,2}, DING Guantao^{1,2}, HAN Yu^{1,2}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute), Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China; 3. Shandong Polytechnic College, Jining, Shandong 272067, China)

Abstract Zhangqiu is rich in spring resources, known as the "Little Spring City", and Baimai spring group is among the 72 famous springs in Jinan. In recent years, the flow of Baimai spring group has been cut off for many times, and the competent departments have implemented a series of spring protection measures to basically maintain the continuous gushing of spring water. Against the backdrop of the planned development and construction of the core exposed area of the spring group, it is urgent to investigate the shallow micro-stratigraphic structure of the exposed area and its relationship with the spring water, in order to avoid the negative effect of engineering construction on the gushing of spring water. Based on the data collected from years of exploration for water supply in the exposed area of spring, this study has been conducted to identify the shallow stratigraphic structure and structural development characteristics of the exposed area of spring, with the methods of geophysical exploration, drilling, and water level observation. Meanwhile, the main influencing factors of spring water gushing in the exposed area have been analyzed, and the sensitive protection area has been delimited. The research findings may provide a scientific basis for the development and construction of the core exposed area of the spring group, and also for the spring water protection.

The results show that the fault structures in the exposed area are highly developed, with a total of 5 faults and 1 fracture zone, becoming a channel for karst water upwelling. The distribution of spring water is closely related to structural development. The West Mawan spring group is mainly controlled by the Yanchi fault, with spring water distributed along both sides of the Yanchi fault, while the East Mawan spring group is mainly distributed along the secondary fault F3 of the Mingshui fault. The gravel layer is widely developed on both sides of the fault, showing a characteristic of thinning and gradually pinching out from the middle to both sides. The gravel layer is in direct contact with the underlying Permian Carboniferous bedrock, and the structure cuts the Permian Carboniferous aquifer, forming a connection between karst water and the pore water of the gravel layer. Pressurized karst water flows up along the

fault structure and enters the gravel layer for storage. The hydraulic connection between pore water and karst water is very close, and the gravel layer has become the "skylight" of karst water. According to the data on groundwater level measurement of the exposed area in 2018, the elevation of pore water level is 55.68–55.71 m, and the elevation of spring and karst water level is 55.78–55.88 m. The karst water level is very close to the pore water level, slightly higher than the pore water level by about 10 cm, indicating a close hydraulic connection between the two, and the karst water supports the supply of pore water. The gravel layer provides storage space for karst water after upwelling, and springs emerge at shallower burial depths. The main factors affecting the gushing of spring water in the exposed area are the control of fault structures and the connectivity and permeability of gravel layers. Based on the comprehensive development thickness of fault structures and gravel layers, sensitive and relatively sensitive areas are delimited, with the area of 0.78 km² and 0.67 km², respectively. It is generally not suitable for excavation of foundation pits in sensitive protected areas; When conducting engineering construction in these areas, the excavation depth of the foundation pit should not be too large and the gravel layer should not be damaged. In addition to taking protective measures during the development and construction of underground engineering, measures of protecting water quantity and quality should also be taken above the surface of the core exposed area. For example, constructing buildings (structures) that may affect the flow of spring water or damage the appearance of famous springs should be prohibited. The discharge of sewage and wastewater into springs is not allowed. The projects such as construction of new karst water wells, excavation of springs, and interception and diversion of water should be banned. In addition, the protection in the recharge area of spring water is equally important. It is necessary to accelerate tree planting and afforestation, seal off mountains for afforestation and grass cultivation, protect vegetation, and conserve water sources. It is also necessary to restrict the construction of buildings (structures) or development projects unrelated to spring water protection, and avoid hardening the ground in the recharge area to reduce the recharge amount. It should be forbidden to dump, pile up or fill urban domestic waste, construction waste, industrial solid waste and hazardous waste. The research findings will provide reference for the protection of similar exposure areas of spring water.

Key words Baimai spring group, the exposed area of spring group, development and construction, spring water protection, Water storage structure

(编辑 杨杨 黄晨晖)

(上接第 1026 页)

direct or indirect recharge via the infiltration of atmospheric precipitation. According to the ¹⁴C ages of the geothermal water at the northern edge of the Ludong Uplift and the significantly negative hydrogen and oxygen isotope compositions of the geothermal water, the main source of the geothermal water supply is paleo-atmospheric precipitation in the southern mountainous area under the cold climate conditions during the Late Pleistocene, and after infiltration, the subsurface runoff is heated by the Earth's heat flow through deep circulation.

Key words karst thermal reservoir, geothermal water, isotopic characteristics, geothermometer, formation mechanism

(编辑 杨杨 张玲)