

北方岩溶大泉地下水系统的圈划： 以太原盆地东西山地区为例

韩冬梅, 徐恒力, 梁 杏

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 运用地下水系统分析理论, 以山西省太原盆地东西山地区为实例, 利用 GIS 技术对区内岩溶大泉地下水系统进行了圈划。运用岩相古地理、地质构造和水文地质分析方法, 首次提取了研究区岩溶含水系统的区域隔水底板等高线、边山断裂两壁投影图及岩溶水系统图等定量或半定量水文地质信息, 圈划出了东西山岩溶水系统的局部饱水带、饱水带和碳酸盐岩非饱水带。研究表明, 西山地区兰村泉、晋祠泉属于同一个岩溶子系统; 西冶泉岩溶子系统是相对独立的岩溶水系统; 东山基岩山区大部分属于娘子关岩溶子系统, 且东山岩溶水子系统与盆地地下水有密切水力联系而与兰村泉—晋祠泉岩溶子系统无直接关系。这些为模拟盆地地下水系统和评价北方岩溶地下水资源提供重要的科学依据, 对前人就太原盆地边山岩溶水系统边界的确定和内部结构的划分提法有了新的认识。

关键词: 岩溶水系统; 圈划; GIS; 太原盆地。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2006)06-0885-06

收稿日期: 2006-03-12

Demarcation of Groundwater System of Big Karst Spring: A Case Study of Eastern and Western Mountain Areas, Taiyuan Basin

HAN Dong-mei, XU Heng-li, LIANG Xing

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper takes the eastern and western mountain areas of Taiyuan basin, Shanxi Province as a case study. On the basis of groundwater system theory and geographic information system (GIS) technique, some quantitative or semi-quantitative structural information was first extracted from lithofacies paleogeography, geology, tectonics and hydrogeology in the study area, including the isolines of the base of regional karst-water aquifers, the projective section of both the planes of a fault and the mapping of karst-water system. The distribution of karst aquifers, the stratum permeability, the boundary characteristics and the relationship between the internal and external system all serve the classification of the karst-water system as local zone of saturation, regional zone of saturation and zone of passage. The research results show that in the western mountain area, the subsystem of Lancun spring and that of Jinci spring belong to the same regional karst-water system, and the subsystem of Xiye spring is an independent karst-water system. The majority of eastern mountain area belongs to the subsystem of Niangziguan spring. The subsystem of the eastern mountain area closely related to the groundwater system in the Taiyuan basin has no direct relation with the subsystem of Lancun and Jinci springs. These scientific evidences can effectively be employed to simulate the groundwater system and to evaluate the karst-water resources in the Taiyuan basin. Meanwhile, some new viewpoints about the boundary and the internal structure of the karst-water system have been presented with the demarcation method in this study area.

Key words: karst-water system; demarcation; geographic information system (GIS); Taiyuan basin.

太原盆地东西山基岩山区,寒武系、奥陶系的碳酸盐岩分布广泛,是我国北方的一个典型的岩溶水蓄水构造,岩溶水是目下太原市最重要的供水水源。前人在该区内曾用传统水文地质分析方法划分了各岩溶大泉的泉域,但很长时间内对泉域边界的确定存在不同的认识。随着地下水和煤炭资源的开采,区域地下水补、径、排关系发生了根本的变化,太原的水源问题日益突出。现有的圈划与生产实践之间的矛盾开始出现,从系统分析的角度认识太原西山岩溶水系统是非常有必要的,这对明确岩溶含水层的空间分布,正确评价岩溶地下水资源有着重要意义。

张人权等(1990)认为,从信息的角度说,岩溶含水系统的圈划过程是在水文地质研究中提取、加工与组织信息,以构建一个反映研究区水文地质特征的简化而不失真模型的过程,对于包括构造地质图在内的地质资料,一般只利用其定性信息,而很少提取其定量信息。本文以太原盆地东西山地区岩溶地下水系统圈划为实例,利用 GIS 技术提取了定量或半定量的地质及水文地质信息;完成了岩溶水系统的圈划,揭示了岩溶含水介质空间分布埋藏规律及岩溶水的补、径、排特征。

1 岩溶含水系统圈划的基本方法

岩溶含水系统圈划是以岩溶含水系统的构成——岩溶含水系统的物质组成、结构及其边界等三部分的分析为基本出发点,通过绘制岩相古地理图、区域隔水底板等高线图及断层两壁投影图等构造定量分析方法来原因。首先,岩溶含水系统物质组成的分析是在研究区域岩相古地理的基础上,综合分析含水介质的空间分布、厚度和岩性(Hess *et al.*, 1989),来确定相对隔水层的位置。其次,岩溶含水系统的结构包括岩溶含水系统所赋存的地质构造和地下水流场。此外,岩溶含水系统的边界的确定是建立在综合分析岩性、构造和地貌的基础上。

1.1 岩相古地理图的绘制

含水层与隔水层的空间分布是系统分析中的重点,这里将岩性和地层等厚线作为反映沉积环境和基底下降幅度的主要标志,进行区域性的岩相古地理研究与编图。

在中国北方岩溶地区,大量野外统计调查表明碳酸盐岩地层的岩相的变化是大尺度的;不同时代海相地层在区域上厚度变化不大,相对较稳定;且岩

溶发育主要以溶隙为主,不同岩性的裂隙发育程度各不相同。为进一步查明含水层和隔水层的分布格局,针对不同含水介质的裂隙发育程度来判定其透水情况,确定出含水层和隔水层,确定具有控制意义的区域隔水底板层位。方法是:利用 GIS 技术,将研究区按一定的比例尺图幅分成各个子区;结合地层沉积厚度绘制研究区内各时代透水地层厚度分区叠加图;将地质图和地形图投影到统一的比例尺(如 1:5 万)图幅内;参照岩相古地理资料中的相关地层等厚线图统计各透水地层及其层厚或总厚;绘制岩溶水系统各个地质时代的含水岩层厚度分布图,并内插出各图幅内的各个地层厚度。

1.2 区域隔水底板等高线图的绘制

中国北方岩溶发育地区裂隙发育,地质构造复杂,降水补给宏观上主要表现为垂直的入渗方式,野外观察表明很少出现散泉,且大部分散泉是由于局部隔水层起相对隔水作用而形成的。这说明宏观结构中,局部隔水层很少对岩溶大泉起控制作用,故连续水流在不同方向上受区域隔水底板格局的控制。岩溶含水系统内部受基底构造的控水作用而进行水量再分配,需要作底板等高线来定量刻画岩溶含水系统的区域隔水底板。底板等高线图可将地层的分布高程和地质构造紧密结合起来。

在岩溶含水系统分析中,利用 GIS 技术在地质图上,采集地形等高线与各地层的界线的交点,依据下面的公式得到每个交点的底板标高:

$$H = H_0 - k / \cos \alpha$$

式中: H 为底板高程; H_0 为采集点的地表高程; k 为该点至区域隔水底板的厚度(真厚度); α 为岩层倾角。用内插法勾绘岩溶含水系统无压区隔水底板等高线图,作为进行岩溶水系统分析的基础。此图可反映岩溶水系统区域隔水底板的相对隆起和相对凹陷和断层断距变化等定量信息。

1.3 岩溶含水系统边界的确定及其水力性质分析

岩溶含水系统边界的圈定是岩溶水系统划分的依据。地下水自然系统往往以地质、水文或水文地质的界线为其边界(陈爱光和徐恒力,1987^①)。在可能出现边界的地段,结合区域隔水底板等高线图和水位资料,通过绘制水文地质剖面图可以确定边界性质。

在岩溶水文地质研究中,确定断层的导水性对解决供水、矿坑排水及水库渗漏等均有重要意义

①陈爱光,徐恒力,1987. 地下水系统与地下水系统分析. 中国地质大学水文地质教研室(内部资料), 14—15.

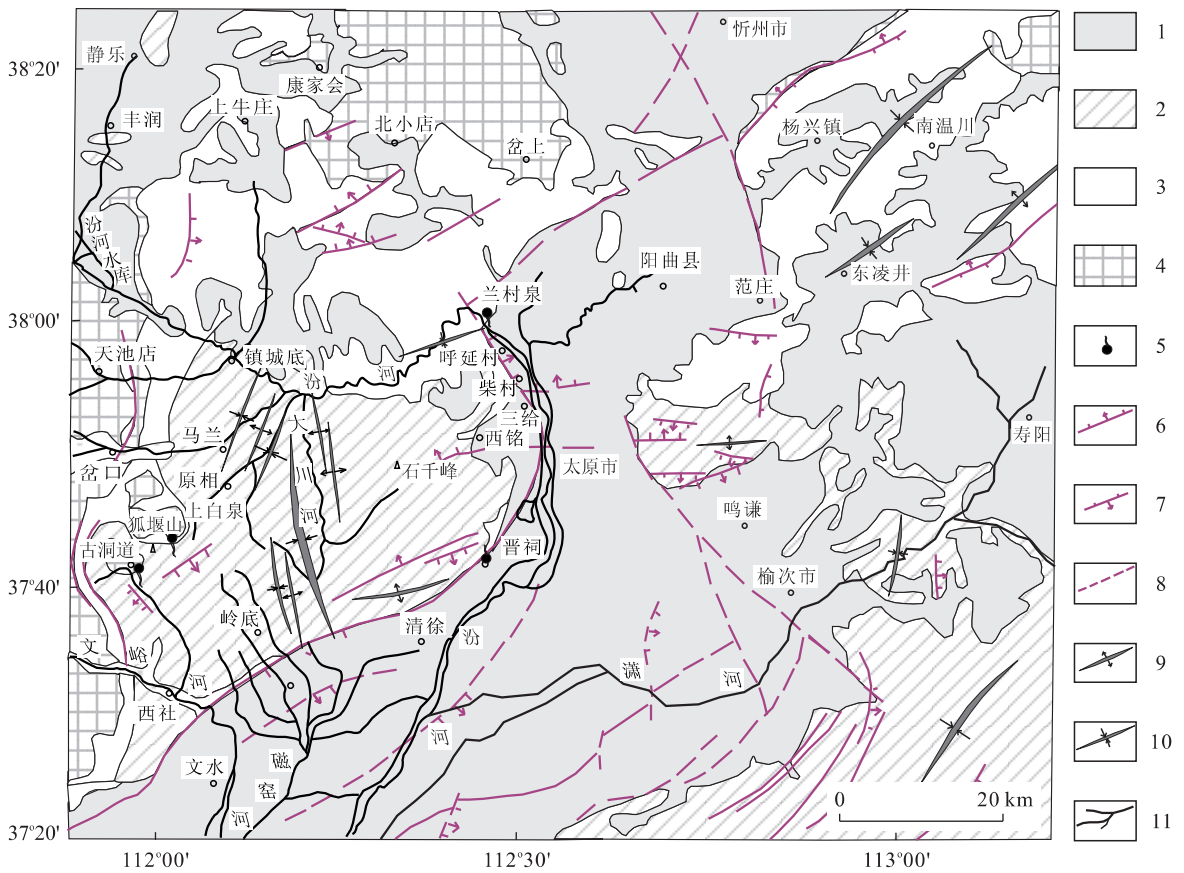


图 1 太原盆地东西山地区水文地质略图

Fig. 1 Sketch map of the hydrogeology in the eastern and western mountain areas of Taiyuan basin

- 1. 第四系孔隙水; 2. 石炭系至三叠系碎屑岩裂隙水; 3. 中上寒武及中奥陶统灰岩裂隙岩溶水; 4. 中下太古界火成岩、变质岩风化裂隙水; 5. 岩溶大泉; 6. 逆断层; 7. 正断层; 8. 推测断层; 9. 背斜; 10. 向斜; 11. 水系

(张人权和梁杏, 1998). 当断层为边界时, 断层两壁投影图是分析断层导水性的有效工具, 可依据断层断距、倾角, 以及两盘地层产状、岩性、厚度来编制. 首先将断层两壁岩层分为含水层、弱含水层及隔水层; 然后据断层两盘地层的空间分布特征绘制一系列垂直于断层走向的水文地质剖面, 将其投影到断层面上; 当断层一盘或两盘为隔水层时, 断层隔水; 两盘弱含水层相接或一盘弱含水层与另一盘含水层相接, 断层弱透水; 两盘含水层相接时, 断层导水.

2 岩溶含水系统的圈划与分析

岩溶含水系统内部结构圈划包括查明含水介质的空间分布格局, 分析岩溶含水系统与周边邻近各系统之间水力性质的接触关系. 通过对区域隔水底板等高线图 and 边界透水性的分析, 综合现有地质及水文地质资料, 编绘岩溶水系统图, 分别圈定碳酸盐

岩非饱水带、岩溶水局部饱水带、岩溶水无压饱水带及承压饱水带的范围, 研究岩溶水系统的内部结构和地下水运移空间上的分布特征. 在缺乏水文地质资料的北方岩溶研究区, 圈定与岩溶大泉相连的区域饱水带时, 适宜在岩溶含水系统隔水底板等高线图上利用泉口出露标高, 按天然水力梯度经验值 (0.5‰~5‰) 推测岩溶水饱水带的水位及其分布范围. 通过闭合的隔水底板等高线圈定小型储水洼地, 其岩溶水水位与区域饱水带水位落差很大或与区域性水位无关时可认为是局部饱水带. 各局部饱水带均可分别汇集其周围岩溶裂隙的分散水流, 形成相对独立的水体, 根据最小功原理, 地下水将沿着水力梯度最大的方向从局部饱水带形成排泄出口输出. 饱水带以外碳酸盐岩的裸露区分布范围是指碳酸盐岩非饱水带. 当隔水顶板底界高程高于区域岩溶水水位时为承压饱水带, 反之为无压饱水带. 无压饱水带的岩溶水空间分布规律及水动力特征主要受区域

表 1 太原西山地区原相图幅(1:5 万)部分采集点的隔水底板高程计算结果

Table 1 Partial results of the elevation of the regional aquiclude in Yuanxiang map area (1:50 000)

ID	高程 (m)	产状 (°)	相交地层	底板高程 (m)	各地层时代的层厚度(m)											
					C_{3s}	C_{3t}	C_{2b}	O_{2f}	O_{2s}	O_{2x}	O_1	ϵ_{3f}	$\epsilon_{3ch} + \epsilon_{3g}$	ϵ_{2z}	ϵ_{2x}	
101	1570	20	C_{2b}/O_{2f}	692					82	232	124	161	37	17	110	62
102	1550	20	C_{2b}/O_{2f}	672					82	232	124	161	37	17	110	62
103	1560	20	C_{2b}/O_{2f}	682					82	232	124	161	37	17	110	62
104	1600	20	C_{2b}/O_{2f}	722					82	232	124	161	37	17	110	62
105	1610	20	C_{2b}/O_{2f}	732					82	232	124	161	37	17	110	62
106	1550	20	C_{2b}/O_{2f}	672					82	232	124	161	37	17	110	62
107	1520	20	C_{2b}/O_{2f}	642					82	232	124	161	37	17	110	62
108	1500	20	C_{2b}/O_{2f}	622					82	232	124	161	37	17	110	62
109	1450	20	C_{3t}/C_{2b}	572			28		82	232	124	161	37	17	110	62
110	1440	20	C_{3t}/C_{2b}	562			28		82	232	124	161	37	17	110	62

隔水底板起伏条件控制,而岩溶水承压饱水带主要受地下水水头控制。

3 实例分析

3.1 研究区概况

太原盆地东西山位于东经 $111^{\circ}45' \sim 113^{\circ}15'$, 北纬 $37^{\circ}20' \sim 38^{\circ}20'$, 地处山西省中部, 基岩山区面积约 $4\ 700\text{ km}^2$ 。区内沟谷纵横, 标高在 $1\ 400 \sim 2\ 000\text{ m}$, 属中低山。其水文地质概况见图 1。

西山地区位于太原盆地的西端, 为向斜构造(关英斌和李海梅, 2001)。区内主要出露太古界变质岩, 寒武系、奥陶系碳酸盐岩, 石炭系、二叠系煤系地层, 三叠系碎屑岩以及新生界沉积等地层。西山的碳酸盐岩裸露面积为 $1\ 128\text{ km}^2$ (哈承佑等, 1989), 主要受汾河以北大面积裸露灰岩区的大气降水的补给(赵永贵和蔡祖煌, 1990)。地下水由西北流向东南, 兰村泉和晋祠泉是主要的排泄点, 均为非全排型山前断裂溢流泉(韩行瑞等, 1993)。东山地区灰岩裸露面积约 700 km^2 。

3.2 西山岩溶含水系统边界性质

3.2.1 岩溶含水系统底边界 研究区内区域隔水底板层位为中寒武统徐庄组底部(ϵ_{2x} 下部页岩)及前寒武系地层, 绘制不同地质时代地层厚度图, 得到厚度值(表 1)。利用 MapGIS, 在地质图上找出地形等高线与透水地层界线的交点, 建成点文件, 其属性数据部分见表 1。利用空间分析功能, 将厚度区文件和点文件进行叠加生成带有隔水底板标高计算结果的点文件, 绘制出整个西山地区岩溶含水系统区域隔水底板等高线图。

3.2.2 岩溶含水系统的边界 大量的水文地质剖

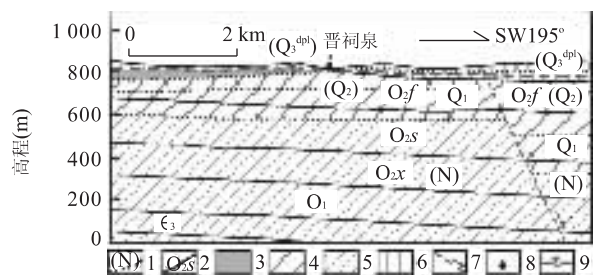


图 2 晋祠一带山前断裂两壁投影图

Fig. 2 Projective section of the both planes of the frontier fault around Jinci spring

1. 西盘地层界线及含水层时代; 2. 东盘地层界线及含水层时代;
3. 含水层与对盘含水层接触; 4. 弱含水层与对盘含水层/弱含水层接触;
5. 隔水层与对盘含水层/弱含水层/隔水层接触; 6. 第四系相对隔水层与岩溶含水层接触; 7. 正断层; 8. 泉; 9. 地下水水位

面表明, 西山岩溶含水系统西边界主要沿西社、岔口一带大断裂分布, 岩溶含水系统与对盘火成岩、变质岩相接触形成相对隔水边界; 北边界受沿北小店一岔上一线的断裂分布, 为相对隔水边界; 西北端的边界上牛庄一带受到区域隔水底板隆起而形成构造分水岭边界; 东南部边界沿上兰村—晋祠一带, 受边山断裂控制而在不同地段有着不同的水力性质。

东山岩溶水系统北边界及东北边界, 除南王庄一带的水位高于盆地地下水水位导致岩溶水补给盆地第四系松散孔隙水而构成透水边界外, 其余都是由于火山岩、变质岩和碳酸盐岩在断裂带附近接触构成隔水边界。其西部边界主要沿倒“S”形边山断裂分布, 且因与盆地基底碳酸盐岩地层有水力联系而构成半透水边界。西南边界在鸣谦以南沿断裂带分布, 此处断层断距大于 800 m , 使得基岩山区承压岩溶水与盆地基底岩溶水在天然状态下无水力联系, 构成隔水边界。

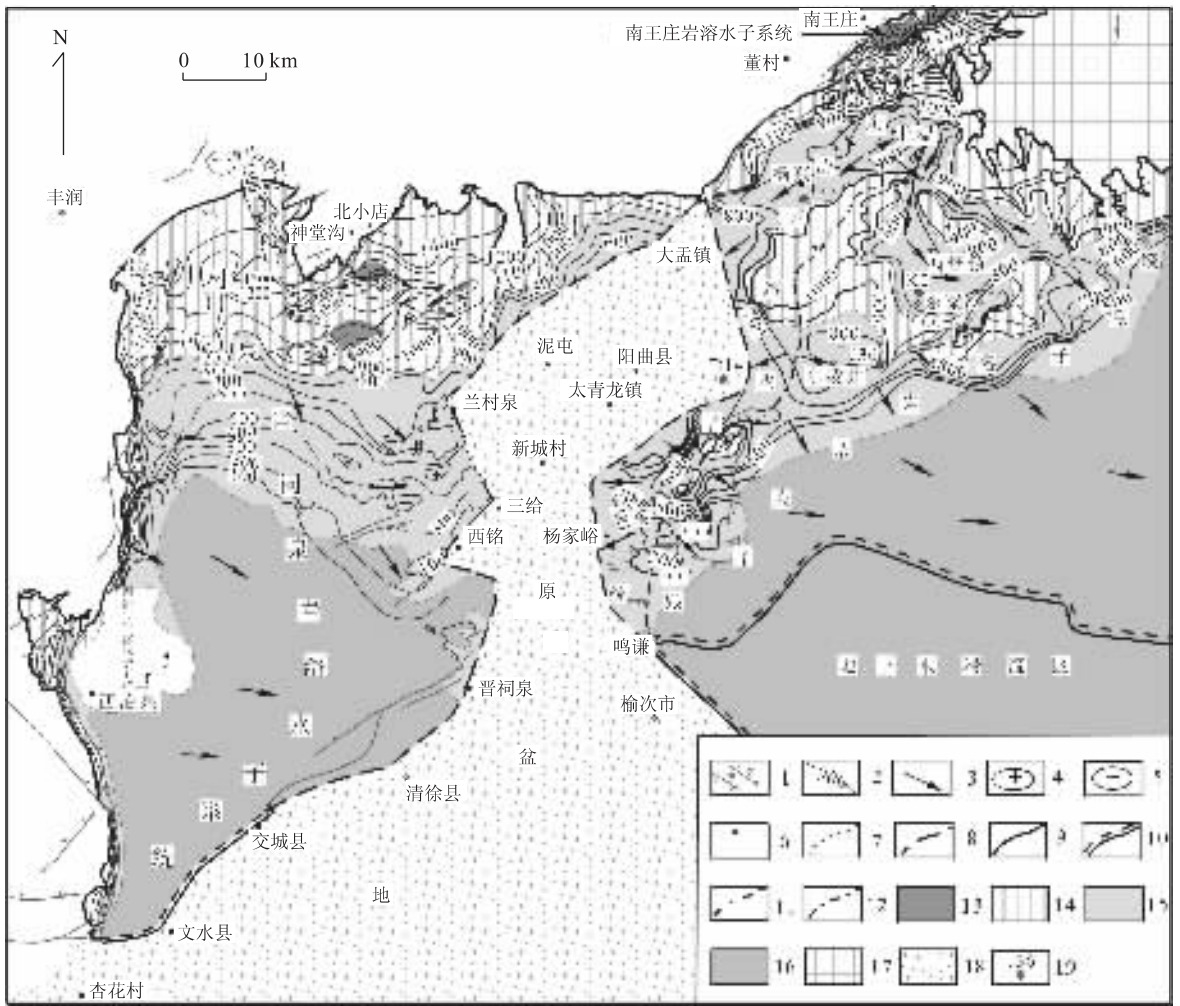


图 3 太原盆地东西山岩溶水系统圈划

Fig. 3 Demarcation map of the karst-water system in the eastern and western mountain areas of Taiyuan basin

- 1. 正、逆断层; 2. 区域隔水底板等高线及高程值; 3. 地下水流向; 4. 隔水底板隆起; 5. 隔水底板凹陷; 6. 泉; 7. 透水边界; 8. 半透水边界; 9. 相对隔水边界; 10. 零通量边界; 11. 构造分水岭边界; 12. 地下水分水岭; 13. 岩溶水局部饱水带; 14. 碳酸盐岩非饱水带; 15. 岩溶水无压饱水带; 16. 岩溶水承压饱水带; 17. 火山岩、变质岩分布区; 18. 太原盆地分布范围; 19. 钻孔及其编号

3.3 东西山岩溶水系统边山断裂的透水性分析

根据上述西山岩溶水系统的岩溶水运动规律分析,结合边山断裂东盘钻孔水位资料,分析断裂带两侧地层岩性的组合关系及其渗透性。如图 2 所示,晋祠泉以北,西盘岩溶含水层与东盘第四系全新统及上更新统透水层接触,此区段上部为透水段;以南,西盘岩溶含水层与东盘第四系下更新统弱透水层相接触,故该区段上部为弱透水段。整个边山断裂的透水性如图 3 所示,不同地段水力联系特征不同。西山边山断裂带使循环较浅的岩溶水以泉的形式沿山前断裂带排泄,循环较深的岩溶水侧向补给盆地内新生界含水层或盆地基底岩溶水。东山地区鸣谦以北,基岩山区区域隔水底板及断裂带两侧岩性对接、水

位等资料表明,东山岩溶水补给盆地基底岩溶水;而鸣谦以南由于断距大导致两盘含水地层失去联系形成零通量边界,易受人为开采影响。

3.4 东西山岩溶含水系统的内部结构分析

综上所述,我们编制了西山岩溶含水系统图(图 3)。由图 3 可见,太原东西山岩溶水系统可分为兰村泉—晋祠泉岩溶水子系统、西冶泉岩溶水子系统和东山岩溶水子系统。

兰村泉—晋祠泉岩溶水子系统的内部结构可划分为 3 个部分:汾河以北的大面积碳酸盐岩裸露区为无压水坡面流动区;中部地区为无压饱水带,分布在汾河河谷一带,碳酸盐岩地层中所夹相对隔水层对泉水的出露有一定的控制作用;在汾河以南多为石炭—三

叠纪地层覆盖,形成承压饱水带,岩溶水以水平向径流为主,地下水流向不受底板控制。汾河以北的降水和地表水大部分首先进入碳酸盐岩非饱水带,岩溶水总的运移方向受隔水底板起伏控制,最终流入饱水带。但由于碳酸盐岩非饱水带水层薄、岩层倾角小、距离长,这部分水量需要较长时间通过局部饱水带的阶梯调节最终汇入区域饱水带,这是造成兰村泉流量动态稳定和滞后的重要原因。分析表明,兰村泉与晋祠泉岩溶水系统并不是两个独立的子系统,不存在可移动的岩溶地下水分水岭。此外,古洞道—狐堰山一带由于相对隔水的火成岩和变质岩圈闭和局部构造控制而不存在区域性的隔水底板,局部上层滞水带形成了西冶泉岩溶水子系统。西冶泉出露高程(1 125 m)与兰村泉(810.92 m)、晋祠泉(802.96 m)相差很大,所以与兰村泉不是一个岩溶水系统。

东山基岩山区,受岩溶水系统区域隔水底板的控制交替出现相连接的构造分水岭和地下水分水岭,结合重要的钻孔的岩溶水水位(D14孔 817.50 m, J36孔 846.5 m, J33孔 981.77 m, K2孔 872.61 m),区分出东山岩溶水子系统和娘子关泉岩溶水子系统,东山北部还出现一小型岩溶水系统——南王庄岩溶水子系统,南部受巨厚石炭—三叠纪地层覆盖而形成地下水滞流区。

4 结论

通过一系列的构造定量分析方法在太原盆地东西山岩溶水系统的应用实例分析认为:(1)岩溶含水系统区域隔水底板等高线可以反映岩溶含水系统无压区的空间构造格局;(2)断壁投影图是分析断层导水性的有效工具。

对研究区所获取的新认识有:(1)太原东西山岩溶水系统可分为兰村泉—晋祠泉岩溶水子系统、西冶泉岩溶水子系统和东山岩溶水子系统。兰村泉与晋祠泉属于同一区域流动系统,而非两个独立的地下水系统,不存在地下水分水岭边界;西冶泉岩溶水子系统是由于局部隔水层形成上层滞水形成的独立的岩溶水系统。(2)将太原西山岩溶水含水系统的西边界定为相对隔水边界,相对于以往将岭底向斜轴线定为泉域边界来说向西南偏移;而西北端为构造分水岭边界;西山东南部边山断裂不具有统一的水力性质。(3)东山基岩山区大部分属于娘子关泉岩溶水

系统,且东山岩溶水子系统与盆地地下水有密切水力联系,而与兰村泉—晋祠泉岩溶水子系统无直接关系。

References

- Guan, Y. B., Li, H. M., 2001. The structural framework and evolution of Taiyuan area. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 20(1): 32—35 (in Chinese with English abstract).
- Ha, C. Y., Tang, B. Y., Lu, R. A., 1989. Characteristics of fissure karst in the Middle Ordovician limestone and groundwater natural resources in the west mountain of Taiyuan, Shanxi Province. *Carsologica Sinica*, 8(1): 41—46 (in Chinese with English abstract).
- Han, X. R., Lu, R. A., Li, Q. S., 1993. Karst-water system; Case study of big karst spring in Shanxi Province. Geological Publishing House, Beijing, 211—220 (in Chinese).
- Hess, J. W., Wells, S. G., James, F., et al., 1989. Hydrogeology of the south-central Kentucky karst, karst hydrology concepts from Mammoth cave area. Van Nostrand Reinhold, New York, 15—64.
- Zhang, R. Q., Liang, X., 1998. Application of quantitative structural analysis in karst-water research. *Geological Science and Technology Information*, 17(Suppl. 2): 15—19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Q., Wang, H. C., Xu, S. Z., 1990. Extraction and organization of the information in the hydrogeologic research. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2: 1—2, 29 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. G., Cai, Z. H., 1990. Research on the karst-water system; Case study of Taiyuan area. Science Press, Beijing, 154—157 (in Chinese).

附中文参考文献

- 关英斌,李海梅,2001. 太原地区构造格局及其演化. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 20(1): 32—35.
- 哈承佑,汤邦义,鲁荣安,1989. 太原西山岩溶发育特征及地下水天然资源的研究. 中国岩溶, 8(1): 41—46.
- 韩行瑞,鲁荣安,李庆松,1993. 岩溶水系统——山西岩溶大泉研究. 北京:地质出版社, 211—220.
- 张人权,梁杏,1998. 构造定量分析在岩溶水研究中的应用. 地质科技情报, 17(S2): 15—19.
- 张人权,王恒纯,许绍倬,1990. 水文地质研究中信息的提取与组织. 水文地质工程地质, 2: 1—2, 29.
- 赵永贵,蔡祖煌,1990. 岩溶地下水系统的研究——以太原地为例. 北京:科学出版社, 154—157.