

# 延河泉岩溶水系统 Sr/Mg、Sr/Ca 分布特征及其应用

王增银<sup>1</sup>, 刘娟<sup>1</sup>, 崔银祥<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 郭天元<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074; 2. 山西省阳城县水利局, 阳城 048100)

**摘要:** 山西省延河泉岩溶水系统是我国北方岩溶大泉之一。依据碱土金属比值 Sr/Mg、Sr/Ca 与矿化度关系, 分析了延河泉岩溶水系统 Sr/Mg、Sr/Ca 分布规律及形成条件。从补给区到径流区、排泄区, Sr/Mg、Sr/Ca 值逐渐增高; 径流条件好, Sr/Mg、Sr/Ca 值低; 径流条件差, 其值高; 径流滞缓区最高。并且 Sr/Mg、Sr/Ca 值主要受径流条件控制, 不受人为作用的影响。因此, Sr/Mg、Sr/Ca 是比较理想的天然示踪剂。根据 Sr/Mg、Sr/Ca 值将延河泉岩溶水系统划分为三个子系统, 即下河泉子系统(泉 1、2、3、5), 延河泉子系统(泉 4、6), 南部散泉子系统(泉 7、8、9)。

**关键词:** 岩溶水系统; Sr/Mg; Sr/Ca

**中图分类号:** P641.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2003)02-0015-05

我国北方岩溶水系统一般汇水面积很大, 有很强的调蓄功能, 不仅流量大, 而且动态比较稳定, 水质良好。这已成为北方最重要的供水来源<sup>[1,2]</sup>。传统岩溶水系统的划分主要是以地下水流场为主要依据。这种划分方法是根据地下水观测水位并结合区域水文地质条件, 作出泉域等水位线图, 判断地下水流向及强弱径流带, 划分岩溶水系统。根据前人研究结果, 海相碳酸盐岩中普遍含有锶元素<sup>[3]</sup>, 且与 Sr/Ca、Mg/Ca 呈良好的线性关系<sup>[4]</sup>。本文根据水化学分析资料, 首先探讨了延河泉岩溶水系统碱土金属元素比值 Sr/Ca、Sr/Mg 的分布特征, 以此划分了山西延河泉岩溶水子系统, 并分析不同系统地下水的形成条件。取得了一些新的认识, 为岩溶水系统划分提供一种新的方法。

## 1 区域水文地质特征

延河泉位于山西省东南部阳城县, 是我国北方典型的岩溶大泉。泉域总面积 2810km<sup>2</sup>, 其中裸露和浅覆盖岩溶区面积为 1177km<sup>2</sup>, 埋藏岩溶区面积达 1633km<sup>2</sup>。

该区属于温暖半湿润大陆性气候区, 多年平均气温为 11.7℃, 多年平均降雨量 620.9mm。沁河由北向南流经该区, 是岩溶水系统内主干河流。沁河以西有三条较大支流: 芦苇河、获泽河、涧河, 以东较大支流为长河。泉域东、西、北三面地势较高, 中部地势较低。

地下水向中间汇合, 沿沁河形成了一系列的泉(表 1), 通常称之为沁河排泄带。其中以延河泉流量最大, 多年平均流量为 3.1m<sup>3</sup>/s, 流量稳定, 可开发利用的价值最大。因此常用延河泉代替沁河排泄带岩溶水系统。延河泉岩溶水系统主要补给来源是大气降水, 局部地区受水库和河流渗漏补给。

表 1 沁河排泄带泉水特征表

Table 1 The spring characters of Qinhe discharge zone

编号	泉名	标高(m)	流量(m <sup>3</sup> /s)	出露层位
1	清水磨泉	485	0.2	O <sub>2f</sub>
2	珍珠泉	480	0.6	O <sub>2f</sub>
3	水磨泉	476	0.8	O <sub>2f</sub>
4	提水站泉	475	0.3	O <sub>2s</sub>
5	西神头泉	470	0.1	O <sub>2s</sub>
6	延河泉	463.33	3.1	O <sub>2s</sub>
7	晋圪坨泉	435.0	0.5	O <sub>2s</sub>
8	赵良泉	420	0.3	O <sub>2x</sub>
9	磨滩泉	386.87	0.4	O <sub>1</sub>

延河泉岩溶水系统北部大面积出露石炭、二叠系砂岩和砂质页岩。该区域以风化裂隙和构造裂隙为主, 且存在多层泥岩和页岩。因此该区域裂隙水一般就地补给, 在适当的位置以泉的形式溢出地表, 泉点较多, 但流量较小。

延河泉岩溶水系统南部主要出露中奥陶统马家沟组灰岩, 占可溶岩面积的 90% 以上, 厚度变化在 350~440m 之间, 是该区的主要含水层, 也是延河泉岩溶水系统的主要储水层。中奥陶统马家沟组灰岩共分为五段, 其各段岩性、岩溶发育和含水性情况见表 2。

收稿日期: 2002-11-15; 修订日期: 2002-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助(90202006)

作者简介: 王增银(1945-)男, 教授, 主要从事水文地质和岩溶地质的教学和科研工作。E-mail: wangzy@cug.edu.cn

表 2 延河泉域中奥陶统各段岩性、岩溶发育及含水性情况表

Table 2 The properties of different rock groups of Ordovician

地层	岩性	岩溶发育情况	含水性
五段 $O_2f$	角砾状泥灰岩	不发育	弱透水层
四段 $O_2s^2$	灰岩、白云岩	发育	含水层
三段 $O_2s^1$	泥灰岩、泥质白云岩	不发育	弱透水层
二段 $O_2x^2$	灰岩、白云质灰岩	发育	含水层
一段 $O_2x^1$	泥灰岩、泥质白云岩	不发育	弱透水层

## 2 采样及分析

此次研究在延河泉岩溶水系统采集岩溶水水样 39 个。根据实际情况采样点试图均匀分布整个岩溶水系统,使水样能反映全系统的情况,同时又能反映岩溶水系统的补给区、径流区和排泄区的不同特点(图 1)。

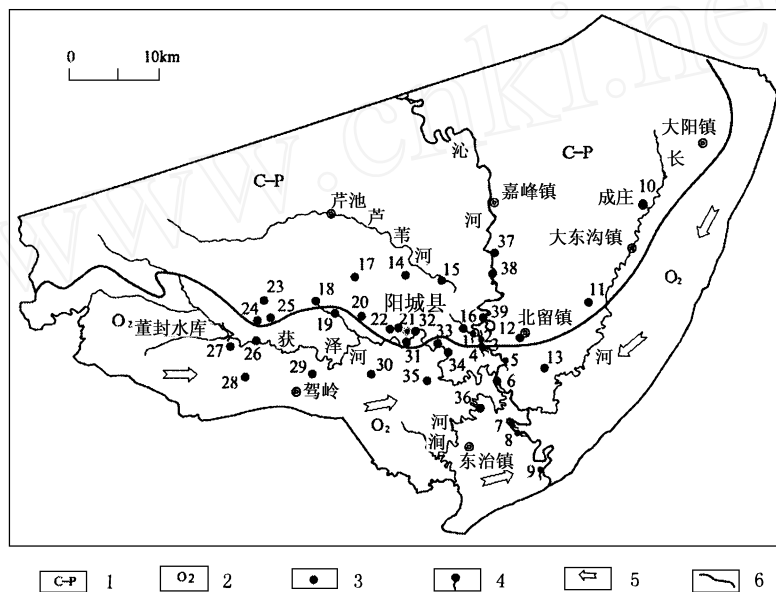


图 1 延河泉岩溶水系统水样点分布图

Fig.1 Distribution of water samples of Yanhe Spring karst water system

1—石炭-二叠系砂岩;2—中奥陶统灰岩;3—井点;4—泉点;5—地下水流向;6—地层分界线

所有的水样均采用离子色谱仪(DX-120)进行常规离子分析,二价锶采用原子吸收光谱仪测定。

为了分析岩溶水系统  $Sr/Mg$ 、 $Sr/Ca$  值分布规律,根据实验数据,分别作了  $Sr/Ca-Sr/Mg$  关系图、 $Sr/Mg-TDS$  关系图和  $Sr/Ca-TDS$  关系图。根据  $Sr/Ca-Sr/Mg$  关系建立的线性回归方程,其相关系数为 0.98,而且各水样在  $Sr/Ca-TDS$  关系图和  $Sr/Mg-TDS$  关系图中分布规律基本一致。

### 3 $Sr/Mg$ 、 $Sr/Ca$ 值分布及形成条件

#### 3.1 $Sr/Mg$ 值分布及形成条件分析

根据各水样在  $Sr/Mg-TDS$  关系图中的情况,可将其划分为五个区(图 2)。

Ⅰ区反映的是补给区。Ⅰ区  $Sr/Mg$  值很低,变化范围为  $0 \sim 0.0004$ 。TDS 也很低,变化范围为  $159 \sim 574 \text{ mg/l}$ 。Ⅰ区中共有 8 个井点和 3 个泉点。8 个井点主要分布在西部灰岩裸露区,直接接受大气降雨的补给。由于岩溶发育,渗透性好,地下水交替强烈,水-

岩作用时间短。致使水中锶含量都很低,故  $Sr/Mg$  值很低,矿化度也较低。其中董封村井(26 号)矿化度最低,其主要原因是其接受董封水库的渗漏补给。壁头井(30 号)是整个区中 TDS 最高的,其  $SO_4^{2-}$  含量达

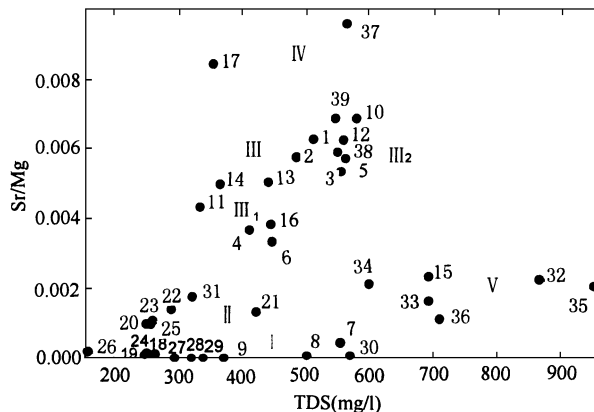


图 2 延河泉岩溶水系统各采样点  $Sr/Mg$  值与  $TDS(\text{mg/l})$  关系图

Fig.2  $Sr/Mg$  vs  $TDS(\text{mg/l})$  of different sampling occasions in Yanhe Spring karst water system

到 251mg/l,这可能与人为开采硫磺矿有关。

该区中有三个泉点,分别为晋圪坨泉(7)、赵良泉(8)和磨滩泉(9),其 Sr/Mg 值较低,这说明三个泉都是近源补给,流程较短,径流条件较好,水循环快,故锶含量低。晋圪坨泉(7)的补给范围相对于其它两泉要大一些,所以 Sr/Mg 值相对较高些。晋圪坨泉(7)、赵良泉(8)的 TDS 比 Ⅰ区还高,这主要与人为活动引起的污染有关。

Ⅱ区反映的是径流区。Ⅱ区中共有 6 个井点,这些井分布区上部一般都有 C-P 的砂页岩覆盖,不能直接接受降雨入渗补给,属于径流区,因此其 Sr/Mg 值较高。而处于同等条件的黄家村井(24)、府底煤矿井(18)和演礼铁厂井(19),其 Sr/Mg 值却比较低。这说明 24,18,19 号井位于强径流带内,水交替强烈,锶含量低。而其余井处于弱径流带内,地下水径流缓慢,水-岩作用较充分,故锶含量增加<sup>[5]</sup>,使 Sr/Mg 值增高。

Ⅲ区中自来水厂 1 号井(21) TDS 最高,这主要与城区人为污染有关。

Ⅳ区反映的是径流排泄区。Ⅳ区中共有 8 个井点,6 个泉点,Sr/Mg 值和 TDS 都比 Ⅰ区大。根据水样点分布又可分为两个亚区。Ⅳ<sub>1</sub>区是裸露及浅覆盖的径流排泄区,Ⅳ<sub>2</sub>区是埋藏的径流排泄区。

Ⅴ区分布的清水磨泉(1)、珍珠泉(2)、水磨泉(3)位于 O<sub>2</sub>f 岩层中,西神头(5)位于属于 O<sub>2</sub>s<sup>2</sup> 岩层中,但是其补给来源都是长河流域。由于径流途径长,水岩作用较充分而富集锶<sup>[5]</sup>,故 Sr/Mg 值较高,属于 Ⅱ区。延河泉(6)与提水站泉(4)的补给来源都是西部灰岩区,补给、径流条件较好,水循环较快,锶含量较低,因此 Sr/Mg 值较低,属于 Ⅰ区。

Ⅵ区中反映的是径流滞缓区。Ⅵ区中仅有两个井点,都属于岩溶水系统北部埋藏区,灰岩埋深较大,地下水径流条件差,水-岩作用时间长,富集锶,故 Sr/Mg 值高。屯城井(37)位于深部埋藏区,地下水径流条件比西河庄头井(17)更差,锶含量也更高,Sr/Mg 值高。

Ⅶ区中反映的是污染区。Ⅶ区共有 6 个井点,这些井均分布于阳城县城关东部地区,属于接近排泄区的径流区,故其 Sr/Mg 值略高于 Ⅰ区,但低于 Ⅱ区,变化范围为 0.001~0.0024。但是,TDS 却几乎是 Ⅰ区的 2 倍。这主要与人为作用有关。其中以张庄井(35) TDS 最高,这主要是硫磺厂废水渗入使地下水的 Ca<sup>2+</sup> 含量达到了 204mg/l,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量达到 433 mg/l,远超过了其它井点的 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量,成为区内 TDS 最高的

水井。

城关东河井(32)位于获泽河旁,受阳城县生活污水的污染,使城关东河井(32)Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 含量高于所有水样。后则腰井(33)和应朝铁厂井(34)位于城关东河井下游,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 含量仅次于城关东河井(32),这说明城关东河井(32)、后则腰井(33)和应朝铁厂井(34)之间有很好的水力联系,属于一个径流带内。

五龙沟井(15)和北大峪井(36)也是因人为污染而呈现较高的矿化度。五龙沟井(15)位于泉域北部灰岩裸露区,该井处于水泥厂区,降水携带空气和地面尘埃颗粒,一起渗入补给岩溶地下水,使得地下水矿化度升高。但该井又处于径流迟缓区,故 Sr/Mg 值为 Ⅰ区最高。北大峪井(36)位于泉域南部裸露区,径流条件相对较好,Sr/M 值较低。但受附近的硫磺矿开采影响,水中的矿化度较高。

### 3.2 Sr/Ca 值分布及形成条件分析

对于相同井(泉)点 Sr/Ca 值一般要小于 Sr/Mg 值,但它们的分布规律基本一致。根据各水样在 Sr/Ca—TDS 关系图(图 3)中的分布情况,亦可划分为五个区。

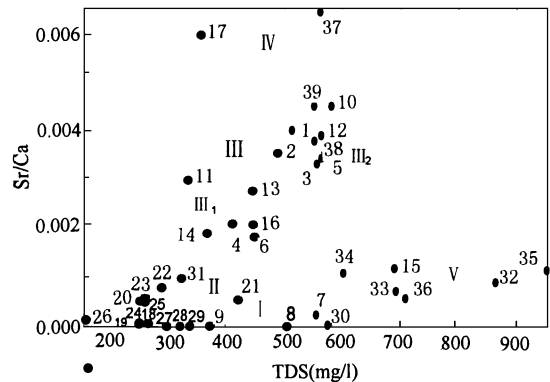


图 3 延河泉岩溶水系统各采样点 Sr/Ca 值与 TDS(mg/l) 关系图

Fig. 3 Sr/Ca vs TDS(mg/l) of different sampling occasions in Yanhe Spring karst water system

Ⅰ区分布与图 2 中的 Ⅰ区完全一样。由于各井(泉)处于和接近补给区,故 Sr/Ca 值很低,变化范围为 0~0.0002。TDS 变化范围为 159~574mg/l。

Ⅱ区分布亦与图 2 Ⅱ区都处于径流区内,故 Sr/Ca 值比较低,在 0.0005~0.001 之间,TDS 也比较低,在 252~424mg/l 之间。

Ⅲ区 Sr/Ca 值变化范围在 0.0018~0.0045 之间。TDS 变化范围为 334~582mg/l。该区 Sr/Ca 和 TDS 相差也较大,亦可划分为两个亚区,即 Ⅲ<sub>1</sub>区,Ⅲ<sub>2</sub>区。其分布规律与图 2 Ⅲ区完全一致,只是白沟井(14)虽然仍分布在 Ⅲ<sub>1</sub>区中,但其分布位置相对于在 Sr/Mg—

TDS 关系图中的位置有较大的变化,这可能是与该井石炭系裂隙水和中奥陶统岩溶水混合开采有关。

区中西河庄头井(17)和屯城井(37)处于径流滞缓区,故 Sr/Ca 值最高。

区 Sr/Ca 值变化范围在 0.006 ~ 0.0012 之间,略高于 区,但低于 区。反映是径流区的特点。但由于人为污染使这些井地下水的 TDS 远大于 区、区。

通过对前面分析,可以得出以下三点认识:

(1) 随着地下水径流途径增长,水-岩相互作用时间增加,水中锶含量逐渐增高。从补给区到径流区、排泄区, Sr/Mg、Sr/Ca 值总体上是增加的。由于地下水滞缓区水-岩作用时间最长,故 Sr/Mg、Sr/Ca 值最高。

(2) Sr/Mg、Sr/Ca 值受地下水径流强弱控制。径流强,水岩作用时间短,水中锶含量低, Sr/Mg、Sr/Ca 值较小。径流弱,水岩作用时间长,水中锶含量高, Sr/Mg、Sr/Ca 值较大。

(3) 人为活动污染地下水,使 TDS 升高,但对 Sr/Mg、Sr/Ca 值影响不大。因此, Sr/Mg、Sr/Ca 值能较好反映岩溶水天然径流条件,可作为岩溶水系统研究的天然示踪剂。

## 4 岩溶水系统划分

前人根据地下水流场,将延河泉岩溶水系统划分为 3 个子系统:即下河泉子系统(清水磨泉,珍珠泉,水磨泉,提水站泉),延河泉子系统,南部散泉子系统(晋圪坨泉,赵良泉,磨滩泉)。本文根据 Sr/Mg、Sr/Ca 值变化,也将延河泉岩溶水系统划分为 3 个子系统,即下河泉子系统,延河泉子系统和南部散泉子系统。但对其中一些井(泉)的归属问题进行了重新考虑。

### 4.1 下河泉子系统

此子系统包括长河流域、芦苇河流域及北部滞缓区。其排泄点是清水磨泉(1),珍珠泉(2),水磨泉(3)和西神头泉(5),均位于 2 区内。10 ~ 17, 37 ~ 39 井点属于下河泉子系统的补给径流区。由于该子系统补给范围比较大,径流途径长,因此水-岩作用时间长,水中锶含量高,又有滞缓区地下水的补给,因此 Sr/Mg、Sr/Ca 值较高, TDS 也较高。芦苇河流域的地下水主要补给清水磨泉(1),长河流域及沁河干流区的地下水补给珍珠泉(2)、水磨泉(3)和西神头泉(5)。前人认为提水站泉(4)也属下河泉系统,但从 Sr/Mg、Sr/Ca 值来看,与延河泉相近,因此该泉应属延河泉子系统。

该子系统有两个强径流带,强径流带 是 15 号到

16 号井点,再到清水磨泉。强径流带 是从大阳,10 号以东,经 11 号井点到 12 井点,再到珍珠泉和水磨泉,其中受局部断层控制,有一部分补给西神头泉。

### 4.2 延河泉子系统

延河泉子系统包括获泽河及南部东西向断裂带以内的广大区域,其排泄点主要是延河泉(6)和提水站泉(4)。18 ~ 35 井点均属于该子系统。该区范围较大,灰岩裸露,直接接受大气降水渗入补给。随着径流途径的增长,水-岩作用时间增加,锶含量逐渐增加。Sr/Mg 值也逐渐升高,但增加的幅度较小,从 0 增至 0.004。说明该子系统地下水径流条件较好,水循环较快。

延河泉子系统强径流带为 27、26、29、30、35 一线。此径流带中,除 35 号井外,其余各个井点均分布于 区,呈现出补给区水化学特征。这说明 27 ~ 35 这一带岩溶非常发育,连通性好,地下水径流较快,很可能形成管道流。延河泉子系统又一强径流带是 18、19、20、22、21、32、33、34 一线。该带下游通过阳城县城关,受城关污水排放影响,地下水已受到污染。32、33、34 号井点的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量较高,但 Sr/Mg、Sr/Ca 值不高,仍然保持着强径流带的特点,但该带的 Sr/Mg、Sr/Ca 值高于前强径流带,说明径流条件不如前者。23、25 号井点位于上述两强径流带之间的弱径流带上, Sr/Mg、Sr/Ca 值比相邻的 24、18 号井点要高一些。从延河泉 TDS 来看均小于前述两个强径流带,说明在南部东西向断裂带附近还有一强径流带。延河泉是前三个强径流带水的混合排泄点。

### 4.3 南部散泉子系统

南部散泉子系统包括晋圪坨泉(7)、赵良泉(8)和磨滩泉(9), Sr/Mg、Sr/Ca 值都接近于 0,说明此三泉补给途径短,水径流条件好。位于东西阻水断裂带上的 36 号井点,以前常因构造原因而归之于延河泉子系统。但根据 Sr/Mg、Sr/Ca—TDS 关系,36 号井点与 7 号泉 Sr/Mg、Sr/Ca 值和矿化度相近,而与延河泉相差甚远。并且 36 号井点  $\text{SO}_4^{2-}$  达 304.3 mg/L,晋圪坨泉(7)  $\text{SO}_4^{2-}$  达 200.3 mg/l,均比赵良泉(8)和磨滩泉(9)高出很多。因此,36 号井点应归属晋圪坨泉补给区域。

## 5 结论

岩溶水中的  $\text{Sr}^{2+}$  是含有游离  $\text{CO}_2$  的地下水与富含锶的海相碳酸盐岩作用的结果,随着径流途径的延长和径流时间的增加,水中  $\text{Sr}^{2+}$  含量逐渐增加, Sr/Ca、Sr/Mg 值亦逐渐升高。人为污染可以使 TDS 增高,但对

Sr/Ca、Sr/Mg 值影响不大。因此 Sr/Ca、Sr/Mg 值能较好反映岩溶水的天然径流条件,排除人为干扰的影响,是岩溶水系统研究理想的天然示踪剂。

#### 参考文献:

- [1] 袁道先,等. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988.
- [2] 韩行瑞,等. 岩溶水系统 - 山西岩溶大泉研究[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [3] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础[M]. 兰州:兰州大学出版社,1997.
- [4] Andrea D, Cicero *et al.* Sr/Mg variation during rock-water interaction: Implications for secular changes in the elemental chemistry of ancient seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica* 2001, 65(5): 741 - 761.
- [5] 王焰新,等. 指示娘子关泉群水动力环境的水化学 - 同位素信息分析[J]. *水文地质工程地质*, 1997, 24(3): 1 - 5.

## Distribution characteristics of Sr/Mg、Sr/Ca and applications in Yanhe spring karst water system

WANG Zeng-yin<sup>1</sup>, LIU Juan<sup>1</sup>, CUI Ying-xiang<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, GUO Tian-yuan<sup>2</sup>

(1. Engineering Faculty, China University of geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Bureau of Water conservancy of Yangcheng county Shanxi province 048100, China)

**Abstract:** Yanhe spring karst water system is one of the famous springs in North China. Based on the graphs of TDS and ratios of Sr/Mg、Sr/Ca, this paper discusses the distribution principles and reasons of Sr/Mg、Sr/Ca of Yanhe spring karst water system. The results indicated that the ratios increase from recharge area to discharge area; the better runoff conditions, the higher ratios, and they arrive at the top in stagnant zone. In karst water system Sr/Mg、Sr/Ca ratios are mostly affected by runoff conditions, not by human activities, they are ideally natural tracers. According to Sr/Mg、Sr/Ca ratio, Yanhe spring karst system is divided into three subsystems taking the hydrogeological conditions into account, that is Xiahe spring subsystem (spring 1, 2, 3, 5), Yanhe spring subsystem (spring 4, 6) and subsystem of scattering springs in southern catchment (spring 7, 8, 9).

**Key words:** karst water system; Sr/Mg; Sr/Ca

编辑:赵继昌

(上接第 109 页)

应在较低的开采量下保证资源的寿命。地热是清洁能源,但在利用时还要尽量减少其对环境的影响。他还建议优化设计北京奥运公园的地热供暖和制冷方案。

其他国家专家分别介绍了各国地热开发利用的先进范例。国内专家主要介绍了北京地热勘察、开发利用和资源管理的新成果和新技术,以及中国的城市地热开发经验及发展趋势分析等内容,让世界更好地了解中国的地热开发现状和发展。

## 2 专题讨论

大会组织了对如何在北京 2008 奥运会更好地开发利用地热资源的专题讨论。在中外主席的联合主持下,中外专家积极发言,围绕奥运规划的大致规模,比较具体地讨论了奥运公园地区的热储条件、生产井和回灌井的数量、钻井工艺和成井产量、地热供暖和热水

供应等利用方案和经济评估等方面的问题。讨论的主要结论是:至 2008 年奥运会开幕前的时间有限,一定要抓紧时间,首先做好勘察工作,认真评价资源,精心设计、精心施工,让地热利用为 2008 奥运会增光添彩。

## 3 共识

研讨会取得了圆满成功,与会的国内外专家都感到会议颇有收益。21 世纪人类面临的能源和环境的挑战更加明显,地热能是具有相当潜力的清洁的绿色能源。虽然前期地热工作取得了一定的成绩,但也普遍存在回灌不利和管理不善等问题。为了地热资源的可持续利用,我们应学习世界先进经验,让 2008 年奥运会体现中国地热开发的新水平。

编辑:吴霞芬