

文章编号:1001-1986(2005)03-0045-03

# 陕西渭北东部岩溶地下水中硫酸盐的形成

马致远, 范基姣 (长安大学环工学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 陕西渭北东部岩溶地下水的水化学和同位素研究表明, 水中硫酸盐起源主要为海相硫酸盐的溶解, 其次为南部泻湖相古沉积咸水的混入。岩溶地下水中的盐分的增加主要是溶滤作用的结果。

**关键词:** 地下水; 硫同位素; 盐化机制; 溶解作用; 硫酸岩起源

**中图分类号:** P641.3 **文献标识码:** A

## Sulphate forming from groundwater in eastern Weibei karst area, Shaanxi Province

MA Zhi-yuan, FAN Ji-jiao

(School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A composition of isotope and chemical data of the groundwater in the eastern Weibei karst area indicates that the sulfate in the groundwater of study area mainly form from marine sulphate dissolves. Secondly the age-old deposit salt water is interused into the groundwater from the south. The higher salinity in groundwater is resulted from the dissolving action.

**Key words:** groundwater; sulfur isotope; salt mechanism; dissolves action; origin of sulphate

### 1 引言

陕西省渭北东北部岩溶水系统是一个复杂的地下水系统。碳酸盐岩仅在系统的西北部有小面积裸露, 其余被松散岩类和碎屑岩掩埋, 隐伏区面积占总面积的85%, 其埋深多在300~1 000 m之间, 这给岩溶水的勘探和研究工作带来极大不便, 需要用多种方法进行对比研究。环境同位素方法作为传统水文地质方法的扩充, 有助于查明地下水的形成及化学成份的形成。本文通过对岩溶水化学成份及同位素特征的研究, 对研究区岩溶地下水硫酸盐的形成进行了探讨。

### 2 研究区概况

研究区位于陕北黄土高原与渭河盆地的过渡地带东部, 西起泾河, 东至黄河, 面积约7 000 km<sup>2</sup>。研究区岩溶含水层为奥陶系和寒武系的石灰岩和白云岩。碳酸盐岩在北部的丘陵山区和洛河等一些较大河流的深切河谷地段裸露和浅埋, 该区是岩溶水的主要补给区。其余大部分地区碳酸盐岩埋深大于300 m。受汾渭盆地梯级断裂控制, 向南进入黄土塬区, 碳酸盐岩被第三、第四系松散岩类覆盖, 其顶面埋深一般在300~1 000 m之间, 愈向南埋深愈大。岩溶水在裸露区或浅埋区接受大气降水和地表水补给后, 沿岩溶裂隙向东南方向运移, 在洛河袁家坡、温汤和黄河东王等地段排泄, 可测的泉流量约5.09 m<sup>3</sup>/s。

### 3 样本的采集和分布

研究区岩溶水的水化学和同位素 D、及<sup>3</sup>H、<sup>18</sup>O 及<sup>14</sup>C 的取样工作始于1987年, 共采集样本112件。大部分样本集中在岩溶水浅埋区, 且以河谷地段居多。硫的同位素的研究取样时间为1997~2001年。在黄河以西北部碎屑岩煤层、西部石灰岩浅埋区、东南部石灰岩中-深埋区及河谷岩溶井泉中采集地下水的<sup>34</sup>S 同位素样品7件(表1), 以上水化学和同位素样品的采集工作为研究区内岩溶地下水硫酸盐的形成提供了基础的信息。

### 4 岩溶地下水的形成

研究区内各类水体的  $\delta D - \delta^{18}O$  关系如图1所示。由图1可以看出:

a. 区内各类地下水点及地表水点基本上落在全球大气降水线下方, 东西部岩溶水点大多压在渭北东部降水线上。根据  $\delta^{18}O$  补给高程计算, 区内东

表1 渭北东部岩溶地下水硫同位素采样点一览表

Table 1 Sampling place for sulfur isotopic study on karst ground water, Weibei area

位置	点号	$\delta^{34}S/\%$
王石凹煤矿	1	16.6
富平小惠乡 YK3 孔	2	22.5
卤泊滩 YR7 孔	3	24.9
富平梅家坪 MP 孔	4	20.4
黄河东王滩泉	5	20
洛河袁家坡泉	6	20.6
富平朱华 FYI 孔	7	25.5

收稿日期:2004-07-26

作者简介:马致远(1956—),女,云南人,长安大学副教授,水文地质工程地质专业。

西部岩溶水的补给高度恰与西部碳酸盐岩裸露山区高程一致。这表明区内各类地下水与河水的最终起源,皆为研究区西部碳酸盐岩裸露山区的大气降水。岩溶地下水与大气降水关系最为密切,说明岩溶地下水接受大气降水补给迅速直接,几乎不存在蒸发作用。

b. 地表水点基本呈直线关系,并与大气降水线的斜率近似,分布于大气降水线的右下方,且有半数的地表水点与西部岩溶水点重合,反映地表水来源于大气降水,但又迅速补给了潜水和岩溶地下水。降水在地表滞留时间短,蒸发作用不明显,地表水点与西部岩溶水点有多处重叠,说明岩溶水的直接补给来源主要是地表水。这一结论与水文地质调查结果相符。

c. 西部潜水与西部岩溶水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  交叉重叠,说明二者有强烈的水力联系。潜水也是岩溶水的补给源之一。

d. 东部岩溶水点位于西部岩溶水点左下方。西部岩溶水平均氡值为 13.13 TU,提示补给途径较短,与大气连通性好。东部岩溶水的平均氡值为 5 TU,与西部岩溶水点的  $\delta$  值大量重叠,表明二者存在补排关系,推断西部岩溶露头区为地下水补给区,而东部是径流排泄区。

## 5 岩溶地下水的盐化机制

研究区岩溶地下水中矿化度变化较大,由西向东,由北向南岩溶地下水在空间上有盐化趋势。岩溶地下水含盐量与  $\delta D$  的关系见图 2。

根据区域环境地质,岩溶地下水的盐化可能与强烈蒸发和盐类矿物的溶滤有关。借助水中环境同位素的组成和含盐量(如溶解固体总量 TDS)的关系可将两者区分开来。如为蒸发作用所致,地下水中的  $\delta D$  应与含盐量成正比,而在溶滤作用下含盐量的增加与  $\delta D$  无关。图 2 中所有的样品点落在了斜率为零的水平线上,说明岩溶地下水盐分的聚集是溶滤作用的结果。在图 1 中,研究区当地降水线斜率不大,说明地下水接受补给时处于弱蒸发环境。东西部岩溶水点大多压在渭北东部降水线上,表明补给环境下东部岩溶裸露区渗漏条件良好,当补给发生时大气降水直接或间接地迅速补给岩溶地下水,几乎不存在蒸发作用。这一分析结果已得到与水文地质调查的佐证。

## 6 岩溶地下水中硫酸盐的形成

$SO_4^{2-}$  是地下水中的一种主要组分,地下水中的

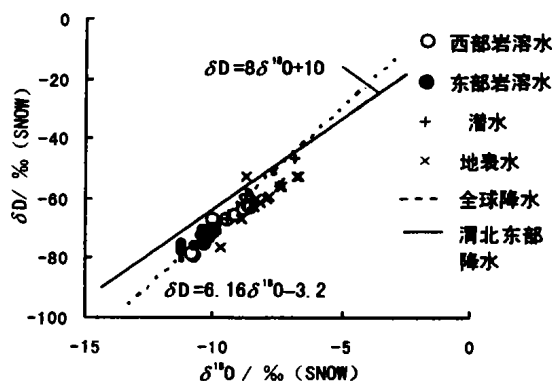


图 1 研究区内各类水体的  $\delta D - \delta^{18}O$  关系图

Fig.1 Relation of  $\delta D - \delta^{18}O$  of water in study area

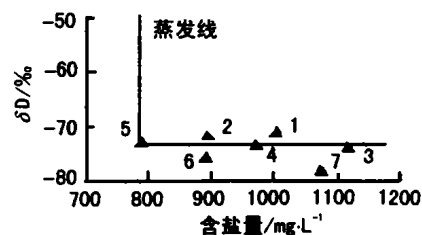


图 2 渭北东部含盐量与  $\delta D$  的关系图

Fig.2 Relation between TDS and  $\delta D$  in the eastern Weibei area  
(注:数字代表样品号,见表 1)

硫酸盐有多种来源,其中包括海相蒸发岩的溶解,与海水或咸水的混合,大气中的硫酸盐及陆地硫化物的溶解。各种来源的硫酸盐岩参与到地下水化学演化过程中,它们是地下水盐化作用的一个重要组成部分。硫同位素及相关的地球化学方法,可用来对这些不同来源的硫酸岩进行区分。在地下水系统硫酸盐的形成的研究中,通常使用的是 $^{34}S$ 和 $^{18}O$ 等硫酸盐的稳定同位素<sup>[1]</sup>。

地下水系统的硫地球化学条件首先是由降水中的硫酸盐所控制的。大气硫酸盐同位素成分的控制因素有:化石燃料燃烧释放的硫酸盐,含硫化物所形成的硫酸盐,由石油和煤燃烧所形成的硫酸盐,其 $\delta^{34}S$ 值的变化范围一般从微负值变化到大约 10‰,而研究区岩溶地下水中的 $\delta^{34}S$ 值变化范围 16.6‰~34‰,不在大气硫酸盐 $\delta^{34}S$ 值变化范围内。由此推断地下水中硫酸盐来源于大气比例极小,可忽略不计<sup>[2]</sup>。

当含硫化物的岩石暴露于地表时,硫化物的氧化可给地表水和地下水提供大量的硫酸盐。这些“陆地”硫酸盐可通过同位素成分与海水起源的硫酸盐区分开来(图 3)。与原始硫化物相比,大多数情况下 $^{34}S$ 在硫化物氧化所形成的硫酸盐中或多或少地发生了贫化。根据 Toran 和 Harris (1989) 的资料<sup>[3]</sup>,在碱金属硫化物的生物介质氧化作用过程中,硫酸盐中的 $^{34}S$ 贫化了 2‰~5‰。而本区硫酸盐中 $^{34}S$ 始终保持了 16‰~25‰的高值,与陆地硫酸

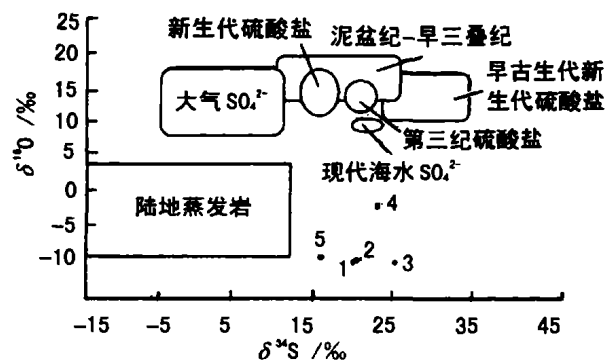
图3 陆地硫酸盐与海水及大气硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 成分对比

Fig.3 The  $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{18}\text{O}$  composition terrestrial sulphates in comparison with marine and atmospheric sulphate  
(据 Toran 及 Harias (1989); 数字表示研究区水样点号)

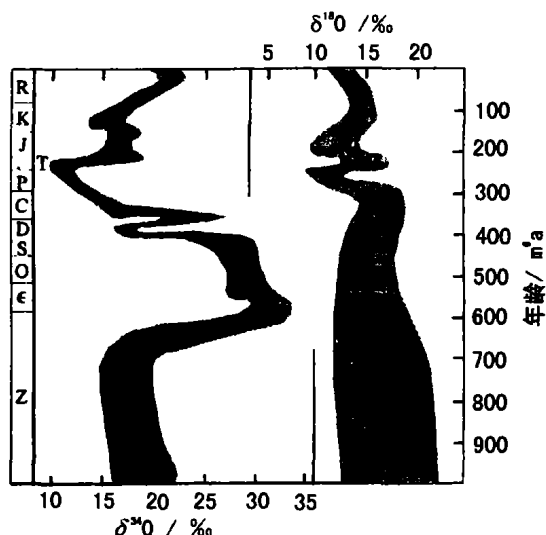
图4 地质历史时期中海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化

Fig.4 The  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  composition of marine sulphate through geologic time  
(注: 据 Ian clark 及 Peter fertz, 1997)

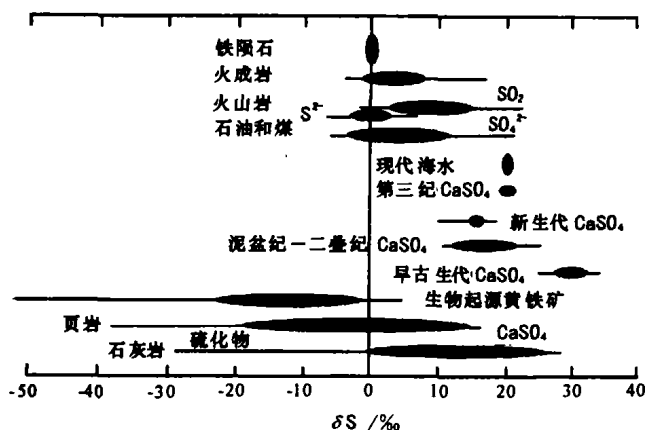
图5 不同物质及环境中硫及硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 含量变化范围

Fig.5 Ranges in  $\delta^{34}\text{S}$  content of sulphur and sulphur compounds in different material and environments

(注: 据 Ian clark, Peter fertz, 1997)

盐 $\delta^{34}\text{S}$  - 15‰ ~ 14‰的变化范围不重合。地下水中硫酸盐形成于陆地硫酸盐的可能应被排除。

现代海水中硫酸盐的同位素成分为:  $\delta^{34}\text{S} =$

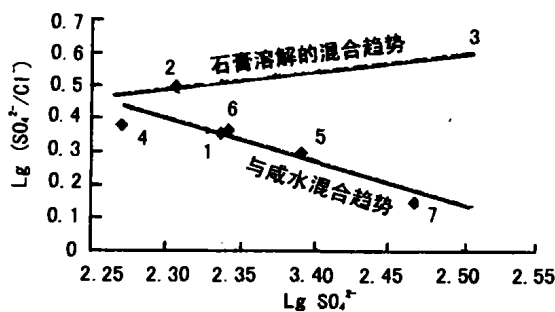
图6 渭北东部地下水的 $\lg\text{SO}_4^{2-}$  ~  $\lg(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$ 的关系图

Fig.6 The relationship between  $\lg\text{SO}_4^{2-}$  and  $\lg(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$  of groundwater in the study area

(离子单位: mg/L)

21‰(CDT),  $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4^{2-}) = 9.5‰$ (VSMOW)。该成分在地质历史时期中发生了显著的变化,图4给出了 $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4^{2-})$ 在地质历史中的变化曲线。 $\delta^{34}\text{S}$ 值超过+20‰的情况一般与蒸发岩和石灰岩有关。在所有主要海相蒸发岩沉积物中都发现了这种变化。把研究区奥陶系和寒武系碳酸岩地下水中硫酸盐的同位素成分,与图4中硫的同位素成分进行对比,发现研究区寒武、奥陶系灰岩地下水的 $\delta^{34}\text{S}$ 在16.6‰ ~ 34‰之间, $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为21.5‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4^{2-})$ 平均值为9.66‰,大致位于图4中寒武、奥陶系海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围之内。地质勘探资料也证实,研究区奥陶系上峰峰组、上马家沟组广泛分布有石膏层,钻孔也揭露了大量散见于岩体中黄铁矿。本区岩溶水硫酸盐中 $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ 变幅在16‰ ~ 25‰范围内,该值位于图5中灰岩和石膏层 $\delta^{34}\text{S}$ 的变化范围内。由此证实研究区奥陶灰岩地下水中硫酸盐的形成海相沉积的蒸发岩的溶解。

从 $\lg\text{SO}_4^{2-}$  ~  $\lg(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$ 关系图(图6)中发现,渭北东部奥陶灰岩地下水中硫酸盐含量的增加可用两种机制来解释:第一种为石膏的溶解作用,在石膏溶作用下,东西方向的地下水中的 $(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$ 则沿程不断增大;第二种为与咸水的混和作用,其总趋势是水点由北向南随着 $\lg\text{SO}_4^{2-}$ 的增加, $\lg(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$ 下降,反映由北部,北东方向补给的地下水在向南部卤泊滩地区汇集时与泻湖相古沉积水及咸水混合的过程。

## 7 结论

a. 研究区环境同位素研究表明,渭北东部奥陶系石灰岩地下水的来源为大气降水、地表水和第四纪潜水。西部裸露山区为补给区,而东部为径排泄区;

文章编号:1001-1986(2005)03-0048-03

# 碎石桩复合地基试验及固结分析

邢皓枫,杨晓军,龚晓南

(浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310027)

**摘要:**碎石桩复合地基在处理软弱地基土中得到相当广泛的应用。为了更好地掌握其规律性,本文针对某电厂碎石桩复合地基现场试验和桩身应力测试成果,进行了分析和总结,得出了饱和粘性土地基中桩土应力比与外荷载大小有关。其形状为上凸抛物线型,大小一般在3~6之间;静载荷试验下桩身应力分布特点与天然地基应力分布近似,影响深度为载荷板宽度的2~3倍。通过用有限元法模拟该复合地基固结性状,得知碎石桩不仅大大加快粘性土复合地基固结,而且减小了工后沉降的影响。

**关键词:**静力载荷试验;碎石桩;地基;固结

**中图分类号:**TU472.3 **文献标识码:**A

## Field tests and consolidation analysis of gravel pile composite foundation

XING Hao-feng, YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan,

(College of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The application of gravel pile composite foundation is extensive for reinforcing soft soil. In order to hold its regularity, this paper allows for the stress ratio of pile and its surrounding soil and the characteristic of pile body according to field tests and pile body stress testing of an electric factory. Stress ratio correlates with applied load, its form is a top-protruding parabola and its values are about 3~6. Through static test, the characteristic of pile stress is similar to that of natural foundation and the influencing depth is 2~3 times of loading plate. The consolidation of composite foundation is simulated by finite element method and its characteristic is that the gravel pile will not only greatly quicken the consolidation of composite foundation but also lower the effect of post-construction settlement.

**Key words:** plate loading test; gravel pile; foundation; consolidation

## 1 引言

碎石桩复合地基自上世纪70年代开始用于加固粉土和砂性土以来,已取得了较好的经济效益和广泛的应用,其理论研究比较广泛和深入,但是对粘性土地基中碎石桩桩身与桩间土的受力机理、变形性状等方面的研究尚不深入,且其固结还是一个悬而未决的问题。本文通过某变电所碎石桩复合地基,对碎石桩处理饱和粘性土后的复合地基采用动静力触探、标准贯入试验和静载荷试验等手段进行了检测;在桩土中埋置压力盒,用来分析桩土应力比

在粘性土地基中的变化规律;通过桩身压力试验,找到了碎石桩在载荷试验下应力分布趋势。还用有限元法对碎石桩复合地基进行实际的模拟与计算,得到了其固结特性。

## 2 工程概况及地层情况

杭州某变电所工程因场地地质条件很差,且构筑物较多,考虑到工期时间紧,主体荷载位置设计方案未最终确定,计划在整个场地采用碎石桩进行了大面积的地基处理。桩呈矩形布置,加固深度10m,桩径426mm,置换率为14%。该变电所主要建(构)

收稿日期:2004-07-05

作者简介:邢皓枫(1969—),男,河南开封人,浙江大学博士生,从事软土和复合地基的研究。

## 参考文献

- [1] 顾慰祖,林曾平等. 环境同位素硫在大同南寒武—奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 14-20.
- [2] 马致远. 环境同位素地下水文学[M]. 西安:陕西科技出版社, 2004.
- [3] 马致远. 环境同位素技术在干旱半干旱地区地下水资源与环境的研究进展[A]. 鄂尔多斯盆地地下水资源可持续性利用研究[C]. 西安:陕西科技出版社, 2004.

b. 研究区内含盐量的增加可用两种机制来解释:一是海相蒸发岩的溶解,即膏溶作用;二是地下水运移中的咸水的入侵;

c. 渭北东部奥陶系石灰岩地下水硫酸盐的补给来源主要是海相碳酸盐岩石膏层的溶解(东西方向),南部地区有泻湖相咸水的混入影响(南北方向)。大气硫酸盐及陆地硫酸盐的补给可忽略不计。