

硫酸盐岩与碳酸盐岩复合岩溶发育机理 与工程效应研究

卢耀如, 张凤娥

(中国地质科学院, 北京 100037)

[摘要] 硫酸盐岩和碳酸盐岩常共同分布, 以往多是分别研究其岩溶发育。文章主要从自然条件上研究两者复合岩溶发育的机理, 探讨了化学岩溶作用过程和生物岩溶作用的机理。复合岩溶中, 陷落柱是很重要的一个特征。文章也探索了复合岩溶作用中, 有关岩溶地下水的地质情况。

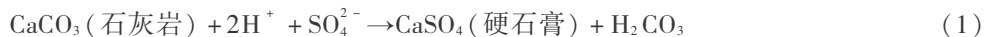
[关键词] 硫酸盐岩; 碳酸盐岩; 复合岩溶; 陷落柱; 地下水水质

[中图分类号] P588.24⁺5, P588.24⁺6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)04-0004-07

碳酸盐岩在我国分布广泛, 这是中外学者所公认的客观情况。但是, 硫酸盐岩在我国的分布也很广泛, 其中石膏和硬石膏, 分布遍及我国各省、区; 特别是, 硫酸盐岩和碳酸盐岩常共存, 这就出现硫酸盐岩和碳酸盐岩的复合岩溶问题。但是, 以往对这两者的研究多限于其岩溶的发育规律。

1 硫酸盐岩和碳酸盐岩的共生分布

碳酸盐岩有海相、湖相之分, 而硫酸盐岩也有海相和湖相。在这两种环境下, 经常会出现硫酸盐岩



石膏本身可直接为水溶解, 在过饱和的水溶液中, 又易于生成次生石膏的晶体。

2 岩溶生态水文地质

目前, 国际上很重视生态水文(eco-hydrology), 包括生态水文地质(E_h , eco-hydrogeology)。许多学者在研究多种水环境及不同气候条件下的生态水文问题, 也有不少人注意到有关水、大气、土壤间的交换作用与相关性定量评价。生态水文地质的特性

和碳酸盐岩共生的现象。在我国北方的奥陶系、南方的三叠系和寒武系等岩系, 也多有这两类可溶岩共生分布的现象。此外, 硫酸盐岩还有热液作用沉积, 其中包括变质、火山交代和区域变质而生成的石膏、硬石膏等硫酸盐岩。

这里需要强调的是, 碳酸盐岩的岩溶作用过程可以生成次生石膏, 见反应式(1)。

在含有煤系地层地区, 有 H_2S 分布的地带, 碳酸盐岩作用的结果常形成次生石膏沉积, 这在国内外是很常见的。

对于白云岩, 见反应式(2)。

涉及到多种因素, 概括表示于下式:

$$E_h = QRWASBI \quad (3)$$

式中, Q 为水(资源)的数量与质量, R 为岩体, W 为水体, A 为气体, S 为土体, B 为生物作用(包括乔木、草本植物和微生物作用, 还有动物作用), I 为各种交换变化作用。

例如水—岩作用涉及到:

$$R_c = f(C, E, W, H, T, D, M, B, A) \quad (4)$$

式中, R_c 为岩石变化, C 为溶蚀作用, E 为机械侵

[收稿日期] 2007-12-02

[作者简介] 卢耀如(1931-), 男, 福建福州市人, 中国工程院院士, 中国地质科学院研究员, 同济大学教授, 长期从事岩溶地质科研和工程实践

蚀作用, W 为风化作用, H 为水动力作用, D 为沉积作用, M 为力学性质变化, B 为生物作用, A 为人工作用。

至于岩 - 土之间的变化, 则涉及到土壤中成分与母岩成分之间的富集与迁移系数:

$$A_{r-s} = \frac{E_s - E_r}{E_r} \times 100\% \quad (5)$$

式中, A_{r-s} 为“+”值时表示土壤中母岩成分的

富集, 为“-”值时表示土壤中母岩成分的迁移; E_r 为岩石母岩中 E 成分; E_s 为土壤中 E 成分。

3 生物岩溶作用

在自然界中, 各种生物作用存在着生物食物链及其循环, 如图 1 所示。

生物营养级如图 2 所示。

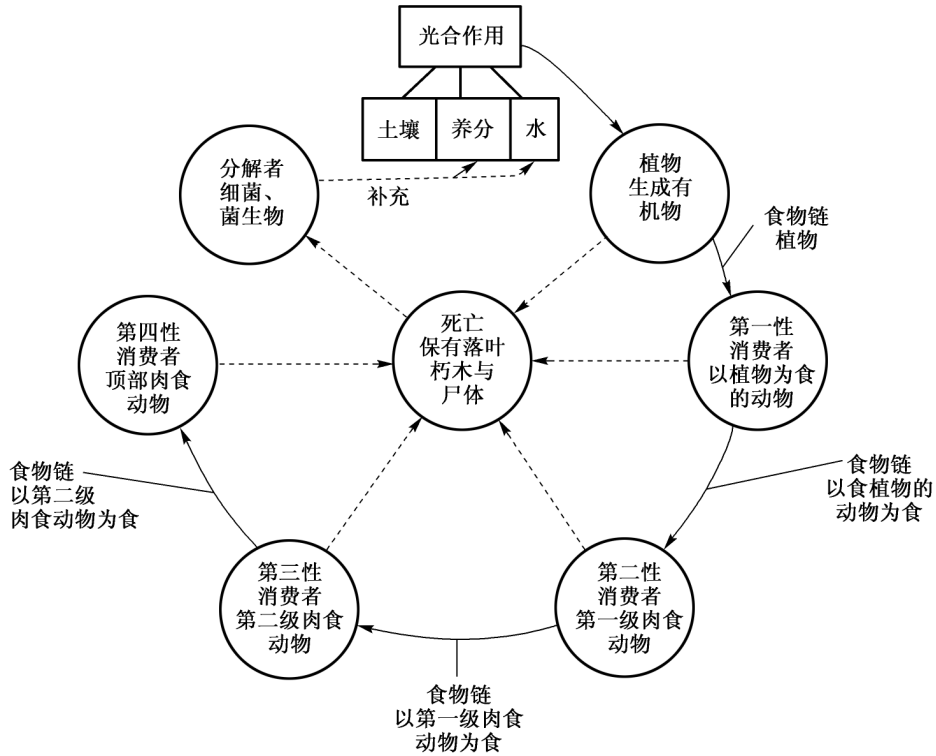


图 1 生物食物链分类及其循环关系图

Fig. 1 Classification of biological foods chains and their circuational relationships

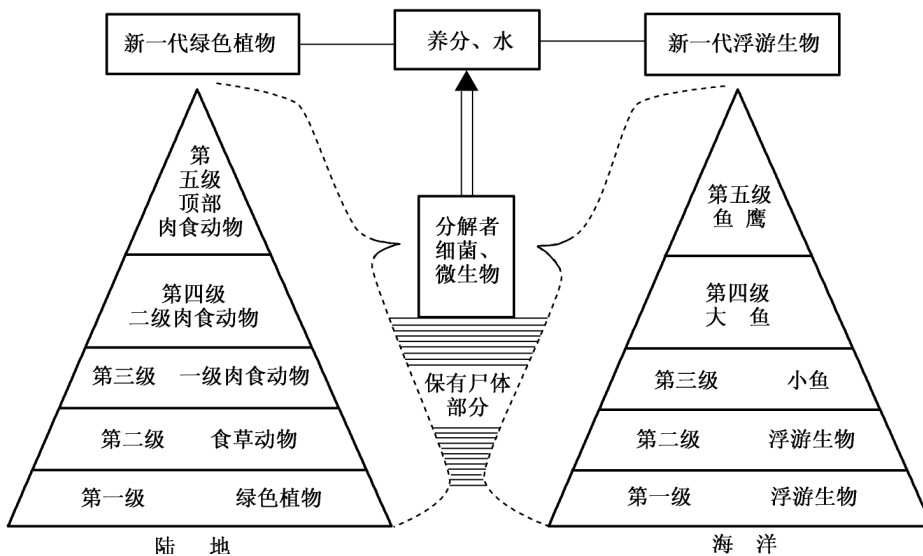
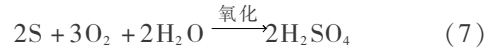
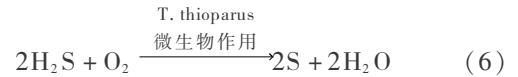


图 2 生物营养级分类简图

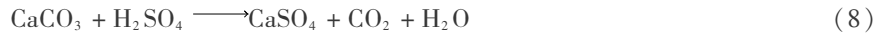
Fig. 2 Classification of biological trophic level

自然界中,生物岩溶作用是多方面的。对复合岩溶而言,笔者主要研究了三种微生物作用。

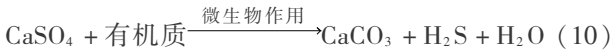
1) 硫杆菌属(*T. thioparus*)。水中有强溶解氧渗入地下,会导致化学作用——氧化作用。使 pH 值降低至 5~4.5 之间, H_2S 氧化后会生成硫酸,反应式如下:



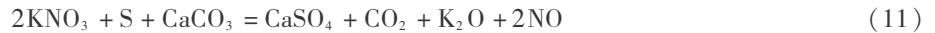
硫酸可以加强对碳酸盐岩的溶解作用,又可生成 CO_2 , 进一步加强对碳酸盐岩的溶解。



2) 硫酸盐还原菌(*desulfovibria*)。在压气条件下,硫酸盐还原菌可以产生 H_2S , 反应式如下:



3) 脱氮盐还原菌(*Td. denitrificans*)。这类厌氧



笔者曾做一系列试验,以探索这些作用。试验结果表明,在硫酸盐岩和碳酸盐岩复合岩溶作用过程中,在不同环境下,微生物岩溶作用是非常重要的。

4 岩溶陷落柱的发育机理

在碳酸盐岩岩溶地区,地下洞穴经常诱发岩溶塌陷现象,这是岩溶洞穴系统的发育—消亡过程中的必然现象。

硫酸盐岩(石膏、硬石膏),岩性软弱,受溶蚀后形成的洞穴系统,在湿热条件下不易长期保存,易于自然塌陷而消亡。

在碳酸盐岩和硫酸盐岩的复合岩溶地区,有特殊岩溶陷落柱现象,曾有专家探讨了其发育的特征,并认为中国复合岩溶地区的陷落柱可概括为几种类型,如图 3 所示。

在图 3 中, A, B, C 三处的陷落柱到达了地表,称为裸露型陷落柱; D, E, F, G 四处的陷落柱则是隐伏于地下,称为埋藏型陷落柱。

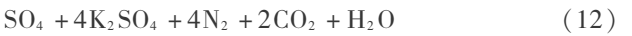
在国外,陷落柱又称为垂直穿越构造(VTS, vertical through structure)。根据笔者在中国及英国等地研究的结果,复合岩溶陷落柱的发育机理可划分为如下几个阶段。

1) 构造形迹切割阶段。在沉积的层状硫酸盐岩(石膏等)与碳酸盐岩地层中,由构造运动产生的形迹,如断裂、节理等的切割,特别是垂直于(或近

于垂直)层面而且封闭(或近于封闭)的两组以上的构造形迹,为陷落柱的产生提供了前提构造条件。

性细菌可在无机培养基中与硝酸盐在原游离氧状态下生长。在其生命过程中,可同化 CO_2 和重碳酸盐中碳(C)。

在厌氧性细菌作用下,硫及硫化物会发生氧化反应,而硝酸盐将有还原作用,其反应式如下:

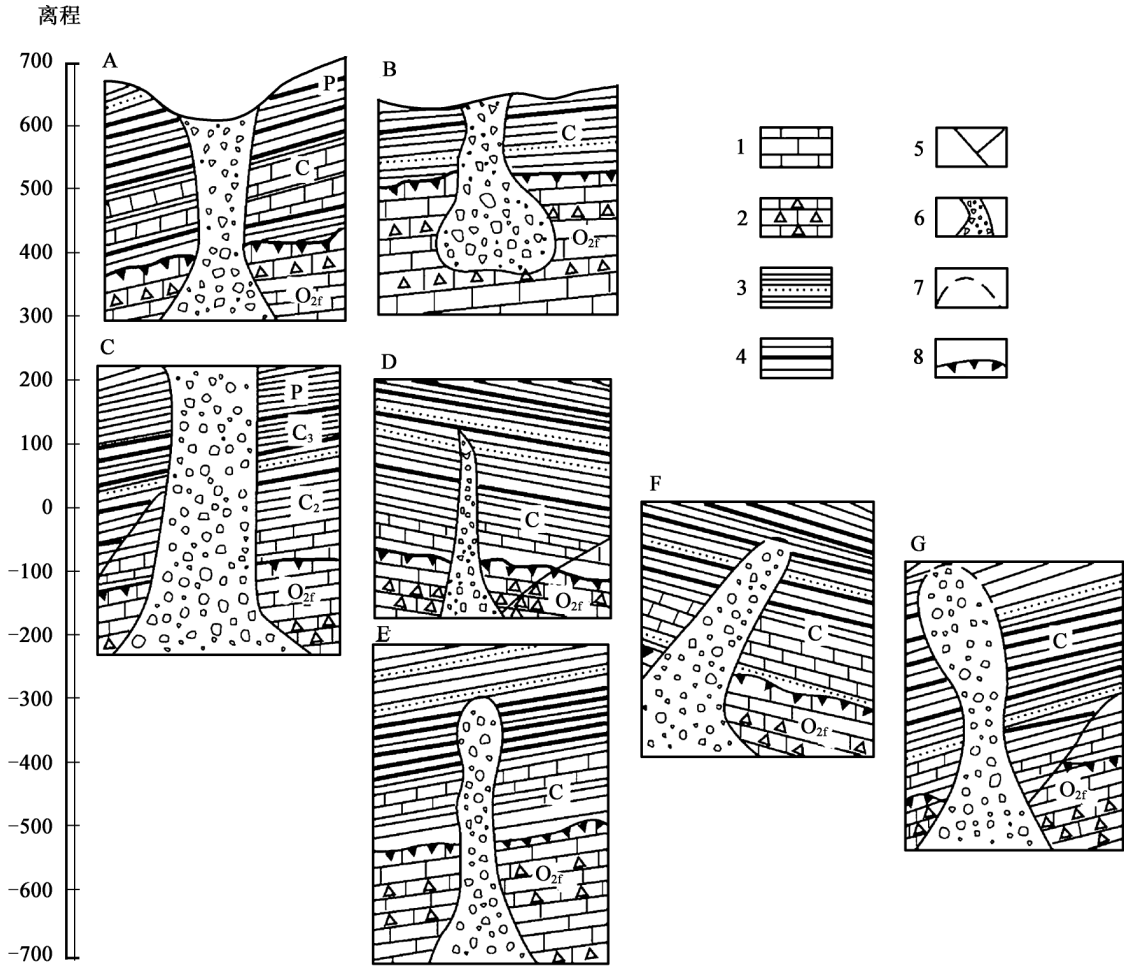


2) 层间溶蚀角砾化阶段。沿构造形迹——断裂、节理等——而下渗的水流不断溶蚀加大这些裂隙空间,也通过层面渗流而溶蚀石膏,使碳酸盐岩岩体受到石膏膨胀应力而破坏,形成角砾化现象。

3) 发育通道空间阶段。由于在可能产生陷落柱的块体中存在不断差异性溶蚀,而且陷落柱下部汇集了较多水流,使岩溶作用强烈发育的同时,形成了空间较大的洞穴与通道,使上部已角砾化的岩体向空间内塌陷。这种通道可连续向上发生,或者是形成多层洞穴。

4) 陷落柱形成阶段。随着陷落柱的发展,在其底部或中间有洞穴或较大溶蚀空间(一层或多层)的存在,从而导致上部角砾化岩体产生陷落。在塌陷过程中,又会使角砾岩体破碎不强烈的岩体进一步破碎,并发生岩体剪切破坏现象。当下部没有大空间存在地带时,陷落柱停止向下发育;当上部岩体较完整时,陷落柱也不再向上发育。

5) 陷落柱复活阶段。由于构造上升,使陷落柱下部聚集水流又发生强烈溶蚀作用,再次形成洞穴通道,导致上部陷落柱继续产生陷落塌陷,导致陷落柱下部洞穴通道的发育,诱发陷落柱塌陷复活,地表可见有塌陷形成的凹地。这一特征在英国 Sunderland 海岸带表现得尤为明显,反映了未复活及复活的陷落柱情况。



1—碳酸盐岩;2—碳酸盐岩角砾岩;3—砂页岩;4—煤层与碎屑岩;5—断层;6—陷落柱;
7—陷落柱的推测边界;8—中奥陶统峰峰组(O_{2f})至中石炭统(C₂)之间的古岩溶作用面
A—山西阳泉;B—山西娘子关;C—河北井陘5号矿井;D—河北井陘1号矿井;
E—河南峰峰矿区9号矿井;F—河北井陘矿区;G—河北井陘1号矿井;

图3 华北地区各种陷落柱剖面综合对比图

Fig. 3 Comparison of karst collapsed columns in North China

6) 陷落柱侵蚀残余阶段。已形成的陷落柱受到强烈侵蚀作用后,可被破坏而消失。但是,由于后期钙质胶结作用的结果,部分陷落柱中角砾块石的裂隙、空洞通道等被充填,反而变得密实坚硬。在这种情况下,陷落柱周围的围岩被侵蚀后,陷落柱主体仍会有部分残留。

我国在华北等地产生的陷落柱规模较大,而且陷落柱体多埋在地下。在英国 Sunderland 海岸一带,陷落柱规模相对小些;而且在海岸侵蚀作用下,早期陷落柱较好暴露在外,因而可更好地分析其发育机理,可参考相应照片以作佐证。

在硫酸盐岩和碳酸盐岩共生情况下,复合岩初期在层间都可被溶蚀,有层面通道发育。硫酸盐岩硬石膏遇水可产生体积膨胀,使岩体破碎;碳酸盐岩

较坚硬,但在其上下层面间有溶蚀通道存在的情况下,如有断裂、节理等,也易于发生塌陷。

对单纯碳酸盐岩自身重力塌陷的机理进行分析后可知:由于溶蚀及地下侵蚀作用,在碳酸盐岩中形成洞穴形态的地下空间,而在洞穴顶部及洞壁处,在重力的驱动下,会失去岩体力学的稳定性,从而产生洞穴顶板或侧壁的崩塌与垮落,当发展至地表时,就形成了洞穴的塌陷,也就是岩溶塌陷。碳酸盐岩是坚硬的,但也有软弱夹层存在,所以洞穴顶部经常不是均一力学性质的岩体。洞穴不断被溶蚀及侵蚀而扩大,洞穴顶部处在通常的悬臂梁状的应力状态(对近水平走向地层而言)下。难于承受上部岩体的压力,需要由拱形洞顶的应力状态才能支撑洞穴顶部以上的岩体压力。

5 复合岩溶地区的环境效应

首先,复合岩溶对地下水水质影响较大,例如娘

表 1 石膏层地下水水质对照表

Table 1 Comparison of underground water quality in gypsum

地点	阳离子					阴离子			
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	总	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	总
S ₁ 钻孔	9.7	23.5	434	114	581.2	201	1 373	14.2	1 588.2
S _x 钻孔	11.9	20.0	466.2	105.9	604.	201	1 107	11	1 319

表 2 娘子关泉域岩溶地下水水质对照表

Table 2 Comparison of karst underground water quality in Niangziguan

地点	阳离子				阴离子		
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
补给区	0.6 ~ 6.7	4.0 ~ 11.4	55.1 ~ 155.3	9.1 ~ 51.7	164.7 ~ 411.8	14.4 ~ 365.5	7.1 ~ 28.37
—径流区	1.0 ~ 1.7	3.5 ~ 49.13	13.4 ~ 266.3	15.8 ~ 86.8	161.7 ~ 366.1	14.4 ~ 261.7	5.96 ~ 86.8
径流区	1.4 ~ 4.0	2.75 ~ 85.1	67.9 ~ 211.9	11.5 ~ 71.7	103.3 ~ 505.4	72.0 ~ 691.6	3.55 ~ 86.87
滞流区	1.0	12.5	244.49	65.66	268.49	609.64 ~ 796.0	12.0 ~ 39.0
排泄区	1.0 ~ 9.48	25.0 ~ 36.5	114.2 ~ 120.2	30.40 ~ 34.68	231.88 ~ 308.1	184.0 ~ 244.95	39.0 ~ 52.47

华北地区最大岩溶泉群——娘子关泉群有 12 个泉组成,出露于山西省阳泉市平定县娘子关附近(见图 4),分布于程家到苇津关约 7 km 长的河漫滩及阶地上面,出露标高为 360 ~ 392 m。主要泉群有:坡底泉、程家泉、五龙泉、石板磨泉、滚泉、河北泉、桥墩泉、禁区泉、水帘洞泉和苇泽关泉。流域面积 4 667 km²,其中裸露及半裸露的碳酸盐岩岩溶面积约有 2 100 km²。泉域构造属于北东翘起的大向斜,控制了作为流域隔水层 O₁ 的分布,同时也控制了马家沟组含水层 O₂ 的分布。在泉口地带,正是由于 O₁ 白云岩抬升,起到相对隔水作用,使岩溶水被阻挡而涌出地表形成娘子关泉群。

泉群流量较稳定,多年平均流量达 12.13 m³/s (1959 年~1984 年),最大流量达 16 m³/s。近些年来,由于流域内大量开发地下水,泉口流量只有 5 m³/s 左右。

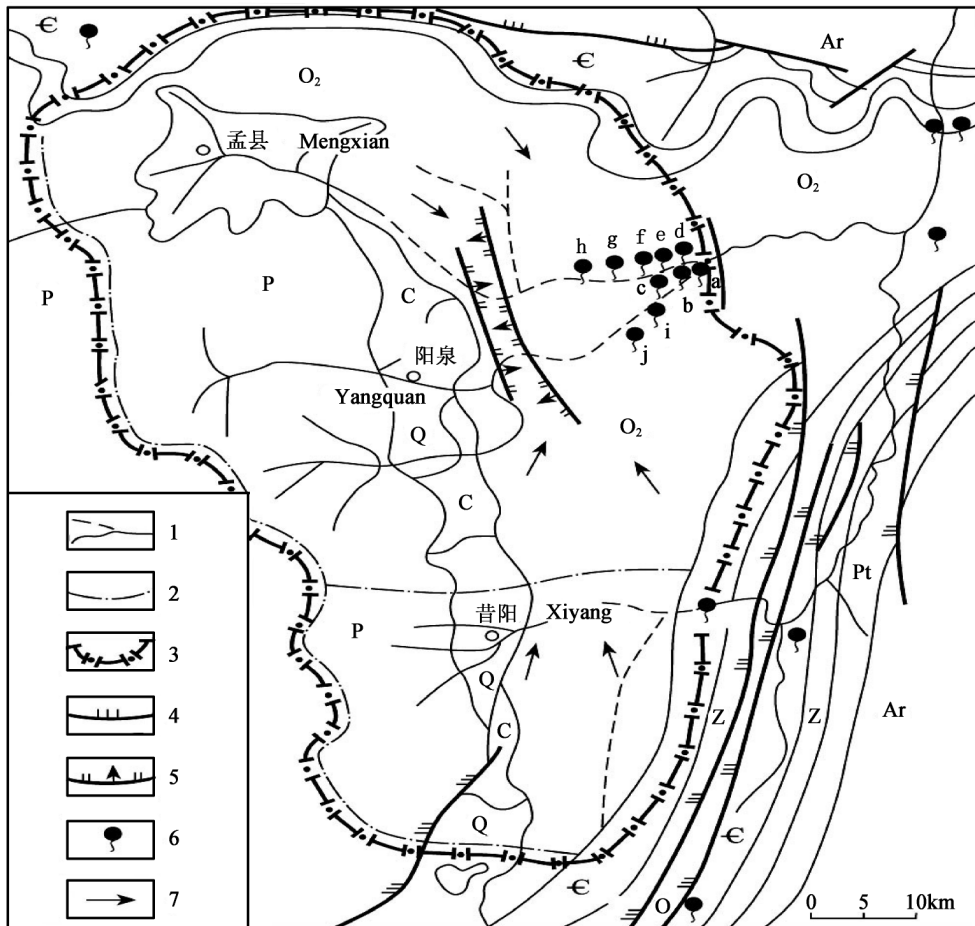
$$C_{QW} = \left[\left[\sum_{i=1}^n \left| \frac{(C_{xi} - C_{oi})}{C_{oi}} \right| / n + \sum_{j=1}^m \left| \frac{(a_{xj} - a_{oj})}{a_{oj}} \right| / m + \sum_{k=1}^l \left| \frac{(Ca_{xk} - Ca_{ok})}{Ca_{ok}} \right| / k \right] + \left[\sum_{t=1}^f \left| \frac{(CO_{xt} - CO_{ot})}{CO_{ot}} \right| / f + \left| \frac{(pH_x - pH_o)}{pH_o} \right| + \left| \frac{(TDS_x - TDS_o)}{TDS_o} \right| / 6 \right] \right] \times 100 \% \quad (13)$$

式中,x 为不同水样;O 为铁匠铺岩溶水;C 为阳离子;i 为 i 项阳离子;n 为对比阳离子数;a 为阴离子;j 为 j 项阴离子;m 为对比阴离子数;Ca 为有关 CaCO₃ 成分;k

泉域内岩溶地下水汇聚有非岩溶地带的地表水流及地下水流,而且在 O₂ 含水层中也含有较多 SO₄²⁻。在附近有石膏层的岩溶地下水中,SO₄²⁻ 含量大于 1 000 mg/L (见表 1)。而在娘子关大泉域,将补给-径流、径流、汇流、停滞及排泄各带的地下水水质进行对比,就可看出水质的变化规律(见表 2)。在补给-径流区,SO₄²⁻ 含量相对较低,最高不超过 365 mg/L,这与当地石膏层的分布有关。在汇流及滞流地带,SO₄²⁻ 一般较高,达 600 ~ 700 mg/L,这除了与石膏层分布有关外,也汇聚渗透了 SO₄²⁻ 含量较低的水流,所以 SO₄²⁻ 含量比在石膏层附近地下水中的 SO₄²⁻ 含量要低得多。

各地岩溶水的水质都会有一定的差异,水质偏差系数 C_{QW} 为:

为 k 项 CaCO₃;CO 为有关 CO₂ 等成分;t 为 t 项 CO₂;f 为对比 CO₂ 等项;pH 为酸碱度;TDS 为总矿化度;C_{QW} 为水质偏差系数;下标 QW 为水质(quality water)。



1—河流与干旱河系;2—地表分水岭;3—娘子关泉域;4,5—主要断裂;6—岩溶泉
 (a. 苇泽关泉;b. 水帘洞泉;c. 五龙泉;d. 禁区泉;e. 桥墩泉;f. 滚泉;
 g. 坡底泉;h. 石桥泉;i. 城西泉;j. 程家泉);7—地下岩溶水流向

图4 娘子关流域水文地质图

Fig. 4 Hydrogeological map of the Niangziguan karst springs

不同地带岩溶水质的偏差系数一般为 15% ~ 40%, 高的可达 80% ~ 100%。若单纯计算 SO_4^{2-} 偏差系数, 则有:

$$C_{QW-SO_4^{2-}} = \frac{(C_{X_{SO_4^{2-}}} - C_{Y_{SO_4^{2-}}})}{C_{Y_{SO_4^{2-}}}} \times 100\% \quad (14)$$

式中, $C_{QW-SO_4^{2-}}$ 为 SO_4^{2-} 的偏差系数; $C_{X_{SO_4^{2-}}}$ 为 x 水样品 SO_4^{2-} 含量, mg/L; $C_{Y_{SO_4^{2-}}}$ 为标准水样中 SO_4^{2-} 含量, mg/L。

例如, 将补给区没有石膏分布地带的 SO_4^{2-} 含量作为基数, 求有石膏层分布地带的 SO_4^{2-} 的偏差系数, 可得到 $C_{QW-SO_4^{2-}}$ 值达数百至 1 000 以上。

在开发深部碳酸盐岩中地下水资源, 除了对深层水资源的形成及其资源量进行评价之外, 更要特别注意, 由于硫酸盐岩的存在, 使水质混合恶化, 其结果还会破坏上部水质较好的碳酸盐岩中的地下水

的质量。含较大水压力的富含 SO_4^{2-} 的硫酸盐岩地下水, 由于人工钻探的深入, 不能很好地进行阻水, 则可能造成上部碳酸盐岩含水层的破坏, 这点已有先例的。

南方碳酸盐岩地区主要发育了暗河系统, 在云南、贵州、四川、重庆、广西、湖南、湖北这 7 个省、市、自治区, 岩溶暗河系统有 3 000 多条, 枯季总流量达 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。浅层的岩溶水由于流量大、水流运动速度快, 所以受硫酸盐“污染”的情况比北方岩溶水要好得多。但是, 深部赋存的地下水, 由于受硫酸盐岩溶蚀作用的影响, 水中含有较多 SO_4^{2-} , 深部水质也变为 $HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Mg^{2+}$ 型和 $SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Mg^{2+}$ 型水。

人工开发效应, 如矿山开采、水利水电建设、房屋建设、道路建设等, 都会诱发塌陷等不良效应, 必须认真研究, 予以适当处理。

参考文献

- [1] 劳普 D M. 古生物学原理[M]. 北京:地质出版社,1971
- [2] 卢耀如. 中国岩溶——景观·类型·规律[M]. 北京:地质出版社,1986
- [3] 卢耀如. 中国西南地区岩溶地下水资源的开发利用与保护[A]. 中国水文科学与技术研究进展[C]. 南京:河海大学出版社,2003
- [4] 卢耀如,刘少玉,张凤娥. 中国水资源开发与可持续发展[J]. 国土资源,2003,(2):134-141
- [5] 卢耀如,张凤娥. 硫酸盐岩溶及硫酸盐岩与碳酸盐岩复合岩溶——发育机理当工程效应研究[M]. 北京:高等教育出版社,2007
- [6] 卢耀如,张凤娥,阎宝瑞. 硫酸盐岩岩溶发育机理与有关地质环境效应[J]. 地球学报,2002,23(1):1-6
- [7] 卢耀如. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M]. 北京:科学出版社,1999
- [8] 钱学博. 石膏喀斯特陷落柱的形成及其水文地质意义[J]. 中国岩溶,1988,7(4):344-348
- [9] 王锐. 论华北地区岩溶陷落柱的形成[J]. 水文地质工程地质,1982,9(1):37-44
- [10] Bayer J S. Plant productivity and environment[J]. Science, 1982,218:443-448
- [11] Fernandez-Illescas C, Porporato A, Laio F, et al. The role of soil texture in water limited ecosystems[J]. Water Resources Research, 2001,37(12):2863-2872
- [12] Golluscio R A, Sala O E, Lauenroth W K. Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses: a manipulative experiment in the Patagonian steppe[J]. Oecologia, 1998, 115(1-2):17-25
- [13] Klimchoud A, Lowe D, Cooper A, et al. Gypsum Karst of the world[J]. International Journal of Speleology, 1996,25(3-4):1-307
- [14] Lu Yaoru, Cooper A H. Gypsum karst in China[J]. Intl. J. Speleol., 1996, 25(3-4):297-307
- [15] Lu Yaoru, Cooper A H. Gypsum karst geohazards in China[A]. The Engineering Geology and Hydrogeology of Karst Terranes [C]. Proceedings of the Sixth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. Rotterdam/Brookfield: A. A. Balkema, 1997
- [16] Lu Yaoru. Karst water resources and geo-ecology in typical region of China[A]. Water Resources and Environmental Problems in Karst [C]. Proceedings of the International Conference and Field Seminars, Belgrade and Koto/Serbia and Montenegro, 13-19 September 2005. Belgrade: National Committee of the International Association of Hydrogeologists (IAH) of Serbia and Montenegro, 2005
- [17] Lu Yaoru, Zhang Feng'e, Liu Changli, et al. Groundwater systems and ecohydrological features in the main karst regions of China[J]. ACTA Geologica Sinica, 2006,80(5):743-753
- [18] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, et al. Ecohydrology of water-controlled ecosystems[J]. Advances in Water Resources, 2002,25:1335-1348
- [19] Williams P W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology[J]. J. Hydrol, 1983, 61:45-67
- [20] Yan Baorui, Zhang Xigen. Microbial Metallogeny[M]. Beijing: Science Press, 2000

Research on Development Mechanism of Sulphate – carbonate Rocks' Compound Karst and Engineering Impacts

Lu Yaoru, Zhang Feng'e

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

[Abstract] Sulphate rock and carbonate rock both are usually distributed together, but their karst developments are most studied separately. It is mainly to research the compound karst developmental mechanism between the two soluble rocks, which are involved in the chemical karstification and the biological karst processes. The karst collapsed column is a special karst hazard of the compound karst, and the karst underground water quality is also discussed.

[Key words] sulphate rock; carbonate rock; compound karst; collapsed column; underground water quality