

文章编号:1001-4810(2012)03-0272-07

屋面雨水回灌裂隙岩溶水水岩作用实验研究

朱中竹, 王维平, 蒋颖魁, 周亚群

(济南大学资源与环境学院, 山东 济南 250022)

摘要:在济南大学西校中采集奥陶系灰岩岩样,并设置不同的地下水、雨水混合比例进行室内溶蚀模拟实验。通过 pH、电导率及几种常规离子的测定,并利用水文地球化学模拟软件 PHREEQC 等方法,分析雨水回灌含水层后与原有的地下水以及含水层介质之间的水—岩相互作用。结果表明:(1)地下水、雨水混合后,随振荡的持续进行,以及温度升高和脱碳酸作用的影响,水中 CO_2 分压不断下降;(2) Ca^{2+} 浓度在混合比例为 9:1、7:3 和 5:5 时略有下降,其它离子浓度无明显变化;(3)随雨水和岩溶系统作用时间的增加,方解石、白云石和石膏的饱和指数均不断减小,且随着雨水回灌量的增加,方解石、白云石饱和指数减小明显,从混合比例 9:1 时的 0.23~0.39 和 0.05~0.97 到 1:9 时的 -0.34~-0.62 和 -1.59~-2.57,表明雨水能增强对方解石、白云石乃至整个含水层的溶蚀,且雨水回灌量越大,溶蚀作用越强烈,影响越明显;(4)雨水回灌所形成的溶蚀量比较有限,不会对回灌井周围含水层稳定产生严重影响。

关键词:雨水回灌;岩溶含水层;水岩作用;饱和指数;含水层稳定性

中图分类号:P641.25

文献标识码:A

0 引言

由于地下水过度开采,不少地方已产生地面沉降、岩溶塌陷、海水入侵、大面积地下水水位下降漏斗等水资源及水环境问题,这对人类的生产、生活造成了严重的影响。可管理的含水层补给不仅可以缓解地下水需求日增的压力,还可在一定程度上改善地下水水质^[1]。利用屋面雨水回灌岩溶含水层是解决我国北方裂隙岩溶区城市水资源短缺、洪灾和保护泉水流量的有效措施之一^[2]。屋面雨水回灌岩溶含水层,除控制回灌水水质外,水—岩相互作用是一种基本的地球化学作用,常导致地下水化学成分及岩石性质的改变,它的发生是以水溶液和岩石之间化学不平衡为前提的^[3]。水—岩相互作用这一术语自 20 世纪 50 年

代提出以来,便得到国内外众多学者的青睐,相关研究^[4-9]迅速发展。本文以济南大学供水井为对象,通过室内溶蚀模拟试验,结合溶液中常规离子的变化规律,探讨雨水回灌后与裂隙岩溶水的相互作用,拟形成规律性认识为北方岩溶含水层补给工程的实施提供借鉴。

1 研究区水文地质背景特征

研究区位于济南大学西校,属济南市中区,北依青龙山,南为马武寨,属北温带季风气候区。春季干燥少雨,夏季炎热,冬季寒冷,年平均气温 14.3℃,多年平均降水量 687.60 mm,雨量分布不均,主要集中在 7—9 月份。据钻孔岩溶水多年监测,该区地下水

基金项目:国家自然科学基金项目——城市屋面雨水处理后回灌裂隙岩溶含水层试验研究(40972169)

第一作者简介:朱中竹(1986—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:zheda2012@126.com。

通讯作者:王维平(1961—),男,教授,博士,主要研究含水层补给管理。E-mail:wangweipingwwp@126.com。

收稿日期:2012-06-05

水温 16.7 ℃, pH=7.55, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{—Ca} \cdot \text{Mg}$ 型, 水质较好。研究区地表出露的地层为第四系坡积洪积物, 成分以棕红色粘土、亚粘土为主, 含有少量钙质姜石, 总厚度 25 m 左右, 下部基岩为中下奥陶纪地层。中奥陶统上部以青灰色泥晶、结晶石灰岩、豹皮状灰岩为主, 夹两层深灰色白云岩及白云质灰岩, 岩溶裂隙发育, 富水性较好, 为该区主要的含水层; 下部 O_2 为棕黄色及浅黄色白云质灰岩、泥质白云质灰岩和黑灰色角砾状泥质灰岩及薄层灰岩, 含水性相对较差。下奥陶统 (O_1) 以浅灰色、灰白色白云质灰岩为主, 下部含较多的燧石结核及燧石条带, 溶蚀孔洞发育, 为主要含水层段。

用作回灌研究的供水井位于济南大学西校内, 井

深 250 m, 地下水埋深 25.89 m, 涌水量 1 970 m^3/d , 奥陶灰岩含水层厚度 93 m。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

实验所用岩石取自济南大学西校, 属中奥陶统上部八陡组中厚层质结晶灰岩, CaO 含量 49.56 %, MgO 为 2.59 %^[10]。2011 年 8 月 25 日—9 月 25 日间, 根据济南大学西校信息楼顶安装的自记式雨量计监测, 取降雨量 6 mm 后的屋面雨水, 并同时从学校水井中取岩溶水样。对所取的屋面雨水及地下水水样进行分析, 结果列于表 1。

表 1 屋面雨水和地下水的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of roof rainwater and groundwater

水样	电导率 $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	温度/℃	氧化还原 电位/mv	HCO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	NO_2^-	$\text{NH}_3\text{—N}^-$
雨水	227	7.43	20.3	149.9	53.78	7.95	4.03	2.35	20.96	5.74	6.55	1.74	0.15	0.49
地下水	876	7.202	18.2	260	317.78	23.79	0.29	16.95	145.18	61.50	21.995	17.2	未检出	0.07

注: 表中各离子浓度单位为 mg/L 。

总体看, 由于夏季雨量充沛, 取样前经几次雨水冲刷, 除掉了大气中及屋顶的颗粒等污染物, 因而雨水中污染物较少。与雨水化学成分对比, 地下水中离子浓度明显升高。其中, NO_2^- 的浓度位于检测限以下, 说明其未受较高浓度有机污染物的污染; 地下水中的钙、镁离子浓度是雨水的 7 倍多, 而雨水中 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的浓度超出地下水 III 类标准 ($\text{NH}_3\text{—N}^- \leq 0.2 \text{ mg}/\text{L}$), 约是地下水的 25 倍。

2.2 实验方法

取样后, 现场条件下立即用 WTW Multi3430 SET 新款手持多参数测量仪测定雨水和地下水的 pH、电导率、氧化还原电位和温度。实验前将石块粉碎成直径 1 cm 左右的碎石, 筛选后使粒径均匀, 用蒸馏水清洗干净后放入干燥箱中干燥 6 h。实验模拟不同比例屋面雨水回灌量与环境地下水量混合对碳酸盐岩的作用, 设定地下水: 雨水分别为 9:1、7:3、5:5、3:7 和 1:9 的 5 种不同混合比例, 将称好的岩石 25 mg 放入锥形瓶 400 mL 的混合液中并

密闭。为缩短作用时间, 在室温条件下, 将混合液放入转速 150 r/min 的振荡器中进行批次实验。设振荡时间分别为 0 h、2.5 h、4 h、12 h、24 h、30 h、40 h 和 60 h。各组批次实验设定振荡时间一到, 立即停止, 取样测定混合液的电导率、pH、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 和 Na^+ 等常规离子的浓度。其中 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用滴定法分析, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 用 TU-1810 紫外可见分光光度计测定, K^+ 和 Na^+ 用原子吸收法测定。一般情况下, 每组除 K^+ 、 Na^+ 之外所有离子都在 8 h 内测定完成。

3 实验结果及讨论

3.1 电导率和 pH 的变化规律

混合液的电导率随雨水所占比例的增加而减少, pH 随雨水所占比例的增加而增加。随振荡时间增加, 混合液的电导率呈降低趋势, pH 总体上呈下降趋势(图 1)。

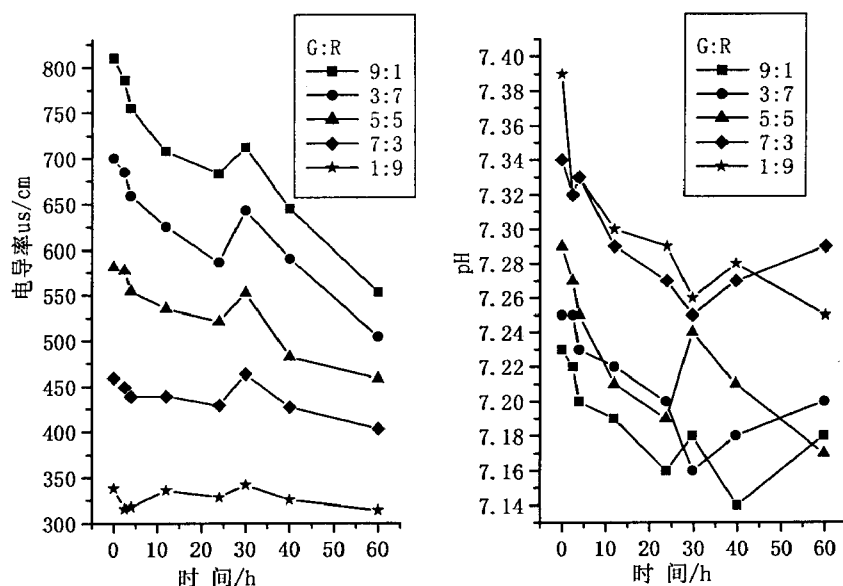


图1 混合液电导率和 pH 的变化, G:R 表示地下水:雨水

Fig.1 Changes in conductivity and pH of the mixed solution, G:R means Groundwater:Rainwater

3.2 其它常规离子的变化规律

由图 2 可知,各离子浓度都是随地下水所占比例的增加而升高,但不成正相关。 HCO_3^- 浓度随振荡不

断减小,除混合比例 1:9 组外,各组 HCO_3^- 浓度在振荡 60 h 后达到相同值,趋向平衡。这是因为水体 CO_2 分压控制着溶液中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的浓度,也控

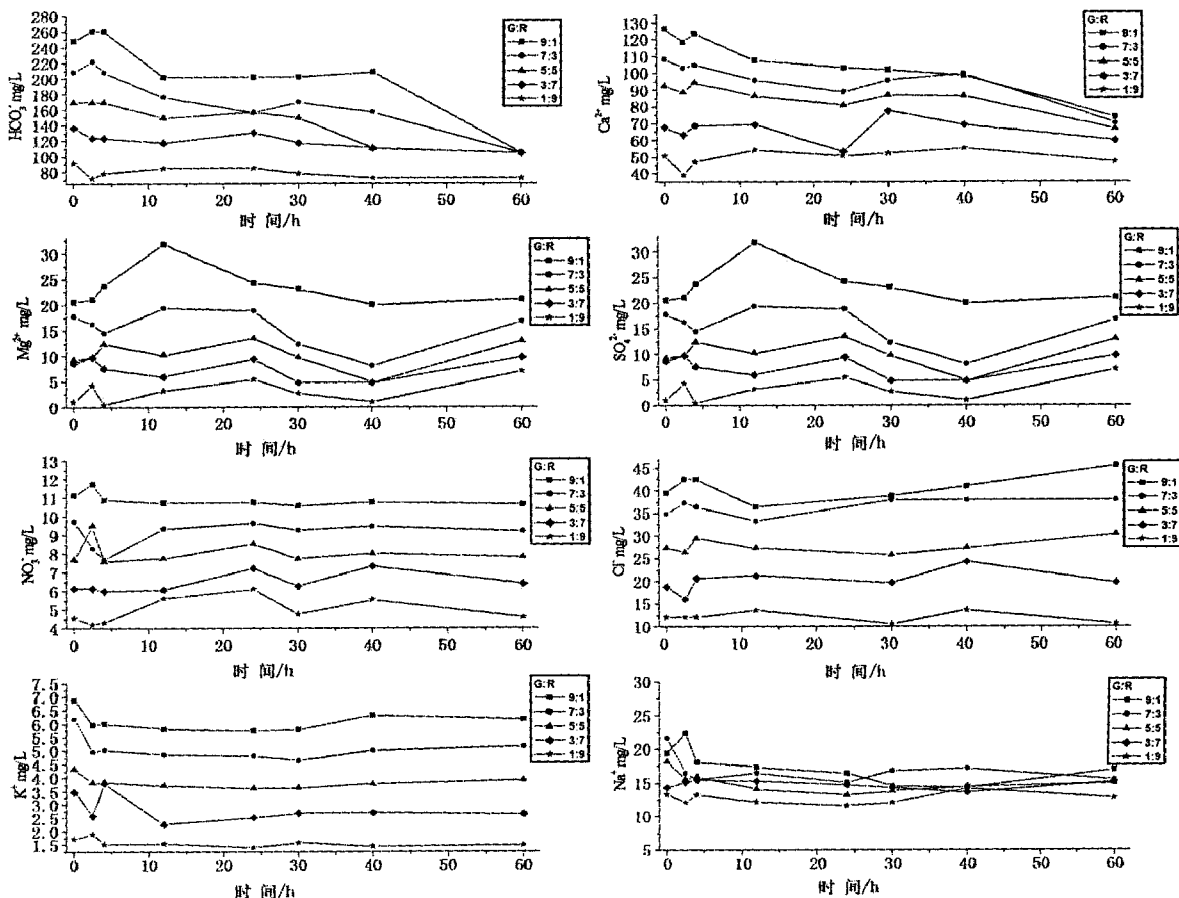


图2 混合液中 HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ 和 Na^+ 的变化

Fig.2 Changes in HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ and Na^+ of the mixed solution

制着 pH。实验在夏季气温较高时展开,CO₂的溶解度受温度升高和脱碳酸作用的影响逐渐降低。通过在实验温度下碳酸平衡常数求得的水体 CO₂分压不断降低也证实了这一点(表 2)。

地下水与雨水的混和比例为 9 : 1、7 : 3 和 5 : 5 且震荡时间 t=0 时,方解石饱和指数(表 4)均大于 0,随着震荡时间的增加,Ca²⁺ 浓度有所下降且趋于相近,很可能是由溶液中 P_{CO₂} 的减小导致方解石和白云石等矿物溶解度降低造成的。其它离子如 Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺ 的浓度都相对比较稳定,无明显变化。

表 2 各混合液中 CO₂分压(单位:Pa)

Tab. 2 CO₂ partial pressure of each mixed solution(Unit:Pa)

时间/h	混合比例				
	9 : 1	7 : 3	5 : 5	3 : 7	1 : 9
0	10 ^{-1.37}	10 ^{-1.59}	10 ^{-1.84}	10 ^{-2.16}	10 ^{-2.64}
2.5	10 ^{-1.36}	10 ^{-1.56}	10 ^{-1.85}	10 ^{-2.28}	10 ^{-2.96}
4	10 ^{-1.34}	10 ^{-1.60}	10 ^{-1.83}	10 ^{-2.24}	10 ^{-2.80}
12	10 ^{-1.62}	10 ^{-1.79}	10 ^{-1.97}	10 ^{-2.28}	10 ^{-2.67}
24	10 ^{-1.64}	10 ^{-1.92}	10 ^{-1.97}	10 ^{-2.30}	10 ^{-2.70}
30	10 ^{-1.64}	10 ^{-1.82}	10 ^{-1.97}	10 ^{-2.23}	10 ^{-2.76}
40	10 ^{-1.63}	10 ^{-1.88}	10 ^{-2.24}	10 ^{-2.33}	10 ^{-2.81}
60	10 ^{-2.36}	10 ^{-2.38}	10 ^{-2.40}	10 ^{-2.45}	10 ^{-2.88}

3.3 水化学类型和饱和指数计算及分析

对混合液水化学类型用 AquaChem 软件进行分析,雨水为 HCO₃—Ca · Na 型,地下水为 HCO₃—Ca

· Mg 型,混合液中的 Cl⁻ 有点偏高,原因是所取地下水受到人类活动的影响,存在轻微污染。当地下水与雨水的混合比例为 9 : 1 和 7 : 3 时,水化学类型为 HCO₃—Ca · Mg,且随振荡时间的延续基本不变。雨水中各矿物均处于不饱和状态,使回灌水对含水层具有溶蚀作用。混合比例为 5 : 5 和 3 : 7 时,水化学类型转为 HCO₃—Ca,表明随雨水回灌量的增加,裂隙岩溶系统中含钙矿物的溶解逐渐增强。混合比例为 1 : 9,振荡时间为 0 h、2.5 h、4 h 时为 HCO₃—Ca · Na 型,与雨水的水化学类型相同,振荡时间增加为 12 h、24 h、30 h 转为 HCO₃—Ca 型,40 h 和 60 h 又转为 HCO₃—Ca · Na,对该变化特征形成的原因目前还不清楚,有待今后进一步深入研究。

根据水文地球化学模拟程序 PHREEQC^[11] 计算组成碳酸盐岩类岩石的基本矿物^[12]——方解石、白云石和石膏的饱和指数,结果见表 3、4。由数据分析可知,实验前雨水中方解石、白云石和石膏的饱和指数(下分别以 CSI、DSI 和 GSI 表示)均小于零而处于未饱和状态;地下水中 DSI 和 GSI 小于零,白云石、石膏未饱和,CSI 大于零,方解石过饱和。

表 3 雨水、地下水的饱和指数

Tab. 3 Saturation indexes of the roof rainwater and the groundwater

	SI	CSI	DSI	GSI
雨水		-0.95	-2.55	-3.08
地下水		0.25	-0.3	-2.02

表 4 混合液饱和指数

Tab. 4 Saturation index of each mixed solution

时间/h	混合比例														
	9 : 1			7 : 3			5 : 5			3 : 7			1 : 9		
	CSI	DSI	GSI	CSI	DSI	GSI	CSI	DSI	GSI	CSI	DSI	GSI	CSI	DSI	GSI
0	0.23	0.02	-2.58	0.12	-0.19	-2.66	0.03	-0.60	-2.78	-0.13	-0.80	-2.98	-0.34	-2.01	-3.17
2.5	0.21	0.02	-2.58	0.13	-0.19	-2.67	-0.01	-0.63	-2.75	-0.22	-0.90	-2.94	-0.62	-1.85	-3.08
4	0.21	0.05	-2.59	0.09	-0.32	-2.65	-0.01	-0.55	-2.73	-0.17	-0.95	-2.89	-0.49	-2.57	-3.04
12	0.04	-0.11	-2.65	-0.02	-0.39	-2.69	-0.13	-0.83	-2.75	-0.23	-1.17	-2.86	-0.44	-1.76	-3.00
24	0.00	-0.29	-2.79	-0.13	-0.46	-2.88	-0.16	-0.75	-3.01	-0.32	-0.73	-3.24	-0.48	-1.59	-3.29
30	0.01	-0.27	-2.41	-0.09	-0.73	-2.43	-0.10	-0.80	-2.49	-0.23	-1.30	-2.61	-0.53	-2.00	-2.79
40	-0.02	-0.39	-2.63	-0.09	-0.92	-2.64	-0.25	-1.40	-2.71	-0.27	-1.35	-2.81	-0.52	-2.41	-2.94
60	-0.39	-0.97	-2.73	-0.38	-1.03	-2.85	-0.42	-1.21	-2.87	-0.34	-1.12	-3.02	-0.58	-1.64	-3.20

混合比例为 9 : 1 时, GSI 变化范围为 $-2.41 \sim -2.79$, 石膏始终处于未饱和状态。CSI 变化范围为 $0.23 \sim -0.39$, DSI 变化范围为 $0.05 \sim -0.97$, 振荡开始时方解石、白云石处于饱和状态, 但分别在 24 h 和 12 h 后转为不饱和且随振荡饱和指数不断减小。随着振荡, HCO_3^- 含量降低, P_{CO_2} 下降, 而 CSI 和 DSI 却逐渐变小, 方解石和白云石呈现溶解趋势, 这很可能是混合溶蚀作用的结果。有研究表明, 当两种溶液混合, 其中一种溶液对某矿物表现为饱和, 而另一种溶液为未饱和时, 就可能发生混合溶蚀作用^[13], 实验所取地下水 and 雨水正符合这种状况。

混合比例 7 : 3 时, GSI 变化范围为 $-0.43 \sim -0.88$, DSI 变化范围为 $-0.19 \sim -1.03$, 石膏和白云石始终处于未饱和状态。CSI 变化范围 $0.13 \sim -0.38$, 方解石开始时处于饱和状态, 12 h 后转为非饱和, 并随振荡饱和指数不断下降; 随雨水回灌量的增加, 混合比例达到 5 : 5、3 : 7、1 : 9 时, CSI、DSI 和 GSI 都小于零, 方解石、白云石和石膏都转为不饱和状态, 且同样随振荡不断变小, 不饱和程度逐渐升高。

当混和水体中地下水占主要地位时, 根据 CSI 和 DSI 可知方解石和白云石的溶解趋势较低, 但随雨水量的增加, 两者的溶解趋势明显增强; 相同的振荡时间, 混合比从 9 : 1 到 1 : 9, 其 CSI 和 DSI 明显减小, 且 CSI 减小的幅度远大于 DSI, 表明雨水回灌能加强对方解石、白云石乃至整个含水层的溶蚀, 且雨水回灌量越大, 溶蚀作用越强烈, 影响越明显。

对表 4 的数据做相关分析发现, CSI 和 DSI 具有很好的相关性, 最高达到 $R^2=0.97$, 但随雨水比例的升高这种相关性急剧下降, 当混合比例为 3 : 7 时, $R^2=0.0452$, CSI 和 DSI 呈现不相关。产生这种现象的原因是地下水占主要地位时, 溶液中 P_{CO_2} 较高(表 2), 方解石、白云石的溶解主要都受溶液中 CO_2 浓度的控制, 且混合前地下水中方解石和白云石的溶解程度已较高, 所以表现出较高的相关性。但随雨水含量的增加, 一方面雨水对方解石和白云石表现出不等的溶解能力, 另一方面 P_{CO_2} 的降低使得 CO_2 的主控作用逐渐减弱, 同时石膏溶解量的不断增加, 产生的同离子效应和盐效应也起到对方解石的溶解抑制大于对白云石的溶解抑制的效果^[14], 从而导致了两者相关性的降低。CSI 和 GSI 不呈相关性, R^2 最大为 0.1806, 同样也随雨水比例升高相关性降低, 但变化不明显。这是因为石膏的溶解不像方解石一样受溶

液中 P_{CO_2} 的控制, 对 GSI 和 P_{CO_2} 相关分析, 结果也表现出不相关($R^2=0.0535$)。另外从表 4 也可见, 不管混合比例如何, 石膏都呈现高度的不饱和状态, 这与方解石饱和指数的变化不同。这可能也从另一角度说明了石膏溶解的同离子效应对方解石溶解的影响。

4 PHREEQC 混合模拟及含水层稳定性分析

表 3 中雨水的饱和指数表明雨水与含水层的碳酸盐矿物未达到饱和, 因此当雨水注入到含水层后将导致碳酸盐矿物的溶解, 主要是方解石。含水层碳酸盐矿物的溶解可能会增加井的有效半径, 相应增加出水量, 抑制井的慢性堵塞问题, 但也会带来负面影响, 包括井(未加管套的)的坍塌, 间接导致抽出的水浑浊或含有大量的沙子, 粘土颗粒运移进而使含水层中原充填泥土的裂隙发展成为优势流路径, 从而改变了含水层的径流时间。20 世纪 60 年代, 上棉二十一棉纺织厂和上海化工研究院分别对 300 m、1001 m(第四系松散覆盖层为 239 m)的两个承压深层石灰岩井进行回灌试验, 上棉二十一厂三季度共回灌 34.4 万 m^3 , 化工院二季度回灌 30.2 万 m^3 , 两井采用冬灌夏用的方式, 运行多年的监测数据显示回灌有效地提高了地下水水位, 防止了地面沉降, 未有地层坍塌等报道^[15]。另据澳大利亚对 Salisbury 的 4 个回灌井和 2 个抽水井进行的风险评价报告指出^[16], 该区地层是由上覆的第四系(厚 105 m)、下伏的第三系和底部前寒武系基岩组成, 与第四系不同, 下部的第三系分 T1、T2 两个岩性层, 其中 T2 层是回灌的目标含水层, 由石灰岩和砂岩组成, 平均厚度 60 m, 抽水试验证明 T2 含水层的导水系数为 $200 \text{ m}^2/\text{d}$, 储水系数 2.7×10^{-4} 。监测从 2006 年到 2009 年, 年均回灌量 17.2 万 m^3 , 方解石溶解率为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mmol/L}$, 项目运行到现在未出现含水层稳定性问题。尽管济南大学回灌井的第四系覆盖层与上述井相比较薄, 但是仍可借鉴。

用 PHREEQC 的 MIX 功能模拟雨水回灌后与含水层中矿物达到平衡时对含水层的影响, 结果如表 5。由表 5 可见, 随雨水回灌量的增加, CSI、DSI 和 GSI 不断减小, 表明其溶解能力不断增强, 这与上述实验结果一致。对于混合比例 9 : 1 和 7 : 3, 当混合液与含水层方解石达到平衡时, 方解石有从溶液中析出的趋势; 对于混合比例 5 : 5、3 : 7 和 1 : 9, 当混合

液与含水层方解石达到平衡时,则造成含水层方解石溶解。Declan Page 等人^[16]认为,在回灌井周围溶解一个 2 m 半径范围的含水层将引起上覆粘土弱透水层的不稳定,但时间需要用 120~200 年。对于济南大学一个有 165 m 裸段的回灌井,2 m 半径范围内大约含 4 677 t 方解石(含水层总体积 2 072 m³,孔隙度 5%,体积密度 2.7 g/cm³,方解石平均含量 88%)。按年回灌量 500 m³,工程使用年限 30 年计算,根据表 5 所列数据方解石的摩尔转移量为 0.07~0.12 mmol/L,则溶解量为 0.11~0.18 t,远远小于 4 677 t,表明在井的使用年限内,含水层碳酸盐岩的溶解不会对含水层的稳定造成严重影响,但若长期运行,在实际回灌中要定期监测,做好预防。

表 5 混合模拟结果

Tab. 5 The results of the MIX simulation

混合比例	SI			摩尔转移/mmol/L 方解石
	CSI	DSI	GSI	
9:1	0.19	-0.42	-2.07	—
9:1(平衡)	0.00	0.00	0.00	0.18
7:3	0.05	-0.68	-2.19	—
7:3(平衡)	0.00	0.00	0.00	0.04
5:5	-0.13	-1.02	-2.34	—
5:5(平衡)	0.00	0.00	0.00	-0.07
3:7	-0.37	-1.47	-2.54	—
3:7(平衡)	0.00	0.00	0.00	-0.12
1:9	-0.73	-2.16	-2.84	—
1:9(平衡)	0.00	0.00	0.00	-0.11

注:摩尔转移栏中负数表示溶解,正数表示沉淀,—表示模拟中不允许进行摩尔转移;混合比例栏中的平衡指混合液与含水层方解石达到的平衡。

5 结 论

(1)随振荡的进行,溶液中 HCO₃⁻ 浓度不断减小,且除混合比例 1:9 组外,各组 HCO₃⁻ 浓度在 60 h 后达到相同值,趋向平衡。这是水中 CO₂ 的溶解度受温度升高和脱碳酸作用的影响而逐渐降低的结果。

(2)随振荡时间即雨水和地下岩溶系统作用时间增加,CSI、DSI 和 GSI 都不断减小,且随雨水回灌量的增加,CSI 和 DSI 减小明显,从混合比例 9:1 时的 0.23~-0.39 和 0.05~-0.97 到 1:9 时的

-0.34~-0.62 和 -1.59~-2.57,表明雨水能加强对方解石、白云石乃至整个含水层的溶蚀,且雨水回灌量越大,溶蚀作用越强烈,影响越明显。

(3)相关分析发现,CSI 和 DSI 具有很好的相关性,但随雨水比例的升高,相关性急剧下降,到 3:7 时相关性消失。这是因为地下水占主导时,方解石、白云石都受 CO₂ 浓度的控制,但随 P_{CO₂} 的下降和雨水的不断加入,两者表现出不等的溶解能力,同时石膏溶解的同离子效应也对两者起到不等的抑制作用,导致相关性的下降。CSI 和 GSI 则不具相关性。

(4)MIX 混合模拟表明在井的使用年限内,回灌不会对井周含水层稳定产生严重影响。

本文通过室内实验、水文地球化学模拟来定性、定量的研究雨水回灌岩溶含水层后的水-岩作用只是一种探索,随着回灌工程的运行,还需进行深入的研究工作。

参考文献

- [1] 杜新强,齐素文,廖资生,等.人工补给对含水层水质的影响[J].吉林大学学报,2007,37(2):293-297.
- [2] 王维平,徐玉,何茂强,等.城市屋顶雨水回灌裂隙岩溶含水层的国内外案例介绍——兼对济南市屋顶雨水回灌裂隙岩溶含水层问题的思考[J].中国岩溶,29(3):325-330.
- [3] 潘春芳,王建平.金沙江某坝址凝灰岩夹层风化的水-岩作用[J].水科学与工程,2008,(6):62-64.
- [4] 徐中华,李云峰,姜凌,等.鄂尔多斯盆地南区环河组地下水水岩作用研究[J].干旱区自然与环境,2009,23(9):160-168.
- [5] 王焰新,马腾,罗朝晖,等.山西柳林泉域水-岩相互作用地球化学模拟[J].地球科学—中国地质大学学报,1998,23(5):519-522.
- [6] M. Musgrove, L. A. Stern, J. L. Banner. Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2010, 388: 144-156.
- [7] 毛晓敏,刘翔,Barry D A. PHREEQC 在地下水溶质反应—运移模拟中的应用[J].水文地质工程地质,2004,(2):20-24.
- [8] 吴耀国,沈照理,钟佐桑,等.矿井水污染的地表水灌溉入渗过程中的水岩作用[J].煤田地质与勘探,2004,32(3):38-40.
- [9] Matthew I. Leybourne, Eion M. Cameron. Composition of groundwaters associated with porphyry—Cu deposits, Atacama Desert, Chile: Elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70: 1616-1635.
- [10] 山东省地矿局八〇一水文地质工程地质大队.济南保泉供水系统研究[R].1999.
- [11] Parkhurst David L, Appelo C A J. User's guide to PHREEQC (Version 2)—A Computer Program for Speciation, batch-reac-

- tion, One-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-Resources Investigations Report* 99-4259, Denver, Colorado, 1999.
- [12] 胡宽溶, 曹玉清. 碳酸盐岩地区水质和化学动力学模型研究[J]. 水文地质工程地质, 1993, 4: 35-40.
- [13] 钱会, 连珺, 窦妍. 地下水混合作用的碳酸钙溶解沉淀效应[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 55-65.
- [14] 闫志为. 硫酸根离子对方解石和白云石溶解度的影响[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 24-31.
- [15] 上海市水文地质大队. 地下水人工回灌[M]. 北京: 地质出版社, 1977: 50-55.
- [16] Declan Page, Joanne Vanderzalm, Karen Barry, et al. Operational residual risk assessment for the Salisbury stormwater ASTR project[R]. CSIRO: Water for a Healthy Country Flagship Report, April 2009.

Laboratory experiment on water-rock interaction of the karst fracture water after recharged with roof rainwater

ZHU Zhong-zhu, WANG Wei-ping, JIANG Ying-kui, ZHOU Ya-qun

(School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022)

Abstract: Simulation experiment is carried out to test the corrosive interaction between the Ordovician system limestone samples taken from the west campus of the Jinan University with the mixed water of different groundwater to rainwater ratio. The water-rock interaction among the original groundwater, aquifer media and rainwater being recharged is analyzed by means of determination of pH and electrical conductivity as well as several convention ions and using hydro-geochemical modeling software PHREEQC. The results show that, (1) after the groundwater and rainwater being mixed with each other, the CO_2 pressure in the mixed water gradually decreases under the influence of temperature increase and decarbonation along with the oscillation; (2) Ca^{2+} concentration slightly decreases when mixing ratios of groundwater and rainwater are 9 : 1, 7 : 3 and 5 : 5 respectively, while other ions concentration does not change obviously; (3) saturation indexes of calcite, dolomite and gypsum decrease along with reaction time, and saturation indexes of calcite and dolomite decrease obviously along with the increases of recharging rainwater amount, from 0.23 ~ -0.39 and 0.05 ~ -0.97 when the ratio of groundwater to rainwater being 9 : 1 and from -0.34 ~ -0.62 and -1.59 ~ -2.57 when the ratio of groundwater to rainwater being 1 : 9 respectively, which indicating that the rainwater is able to increase the corrosion to calcite and dolomite or even the whole aquifer and that the more the rainwater amount, the more obvious and stronger the corrosive effect; (4) rainwater recharge can only lead limited corrosion amount, so it won't cause obvious impact on the stability of the aquifers around the well.

Key words: rainwater recharge; karst aquifer; water-rock interaction; saturation index; aquifer stability

(编辑: 吴华英 韦复才)