

李凤丽, 王维平, 徐巧艺, 等. 济南市玉符河多水源回灌岩溶水水质风险评价[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 751-758.
DOI: 10. 11932/karst2017y30

济南市玉符河多水源回灌岩溶水水质风险评价

李凤丽¹, 王维平¹, 徐巧艺², 吴深³, 张郑贤¹

(1. 济南大学资源与环境学院/山东省地下水污染数值模拟工程技术中心, 济南 250022;

2. 济南市清源水务集团有限公司, 济南 250011; 3. 济南市卧虎山水库管理处, 济南 250115)

摘要: 济南以泉城而闻名, 保泉和供水安全问题是其面临的巨大挑战, 利用多水源进行岩溶水回灌是解决问题的有效措施之一, 但是补给水源水质相对岩溶水而言较差, 回灌到地下可能存在一定健康和环境风险, 需要对回灌系统的水质进行风险评价。本文对比地下水质量标准 and 地下水水质背景值, 重点选择地表源水超标和劣于背景值的风险源监测指标, 借鉴澳大利亚含水层补给管理指南, 对玉符河多水源回灌岩溶含水层工程运行期的水质风险进行评价。2015 年对黄河水、卧虎山水库两种水源多次回灌期间的源水、孔隙水和岩溶水的 22 项指标进行水质监测和指标分析, 风险残余评价结果表明黄河水回灌补源期间, 平均浊度的标准指数源水是 1.4, 孔隙水 1.7, 岩溶水 0.93, 硫酸盐平均含量的标准指数源水是 0.93, 孔隙水 0.9, 岩溶水 0.73, 氯离子虽没有超过地下水 III 类标准, 但是在源水中含量是地下水含量的 2 倍多; 卧虎山水库水回灌补源期间, 平均浊度的标准指数源水是 2.4, 孔隙水 1.1, 岩溶水 0.43, 硫酸盐平均含量的标准指数在源水 0.75, 孔隙水 0.84, 岩溶水 0.66, 氨氮的平均含量的标准指数源水 1.14, 孔隙水 1.47, 岩溶水 1.35。因此, 浊度、硫酸盐和溶质在裂隙岩溶含水层迁移较快为两种水源玉符河回灌补源工程的共同高风险项和关键控制点。此外, 黄河水补源还需注意盐度, 卧虎山水库水补源还需控制营养物的污染风险。基于以上评价, 还提出了限制回灌量占区域岩溶水资源量比例等建议。

关键词: 多水源回灌补给; 多水源; 岩溶含水层; 水质风险评价

中图分类号: P641.25

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2017)05-0751-08

0 引言

裂隙岩溶水是济南泉域泉水的主要来源和重要的市区供水水源。岩溶水接受济南南部山区的降雨入渗补给和河道渗漏补给, 其中济南泉域西部的玉符河、北大沙河的天然渗漏补给对维持泉水喷涌起着重要的作用。然而随着人类活动的加剧、工业和城市化进程的快速发展, 岩溶地下水直接补给区降雨入渗补给量减少, 地表径流加大, 岩溶水资源量减少, 再加上过去城市大量开采岩溶水, 也改变了河流的补给、径流、排泄规律。为了保护泉水, 济南市压采岩溶地下水, 建设了两座平原水库引黄河水作为城市供水的主

要水源, 形成了以黄河水为主的多水源供水格局。但是黄河水或长江水与岩溶水相比水质较差, 无法满足居民的期望。济南西部玉符河流域上游虽建有卧虎山大型水库可放水补源, 但遇到特枯年或连枯年, 水库蓄水量少, 不能实施放水回灌来维持济西高的岩溶水水位, 导致泉水因补给量减少, 面临停喷的危险。因此, 在玉符河建成了三个地下水补源工程, 采用可管理的含水层补给 (Managed Aquifer Recharge, MAR) 技术, 将南部山区地表水或黄河水通过玉符河放水渗漏补给工程转化成岩溶水, 维持济西岩溶水位高于市区泉水水位, 是保证泉水喷涌的必要条件。

目前, 国内外关于含水层补给管理的风险评价研

基金项目: 山东省水利厅、山东省财政厅《水生态文明试点科技支撑计划》(SSTWMZCJH-SD06); 山东省重点研发计划项目 (2017GSF17121); (JNQY-SZY-GC-2016-001)

第一作者简介: 李凤丽 (1992-), 女, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 1436287118@qq.com。

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

收稿日期: 2017-06-01

究较少,20 世纪 70 年代末美国加利福尼亚州开展了用再生城市废水进行地下水补给的健康评价,其研究成果对于出台 MAR 标准及相应的法律法规有促进作用^[1]。后来国外多位学者发现含水层补给管理工程可控制城市咸水入侵且回采水水质整体上优于补给水源水质^[2-3]。也有学者的研究结果表明回灌水增大了含水层的补给量,同时也增加了各种污染物的含量,且回采水含盐量高不能用于农业生产^[4-6]。Joanne Vanderzalm 对含水层补给风险进行评价,结果表明石灰岩含水层对城市雨洪水污染物具有一定的自然衰减作用^[7]。澳大利亚采用 ASR 或 ASTR 技术将城市雨洪水、再生水在内的多种水源用深井回灌到微咸水承压石灰岩含水层中用于灌溉、工业用水和处理后用于饮用水^[8]。

相比于美国、澳大利亚和荷兰,中国仅对再生水回灌浅层地下水用于非饮用水制定了水质标准^[9-11],整体上地下水人工回灌风险评价体系研究仍比较薄弱^[8]。济南大学开展了将处理后的屋面雨水通过深井补给到岩溶含水层的试验工作,水质监测表明补给到地下的雨水水质大体还满足地下水质量 III 类标准,并借鉴澳大利亚风险管理框架进行了相应评价,证明该工程可行性较高,基本符合实际^[12-15]。周亚群^[16]比照澳大利亚含水层补给管理国家指南对济南大学甲子湖下游的汛期屋面雨水经处理回灌裂隙岩溶含水层工程进行相关风险评价,结果显示该项目可行,总体难度较低,但仍需改进预处理设备来提高污染物去除率,并定期用回灌井回抽。

综上所述,国际上对于含水层补给管理系统的研究日趋成熟,例如澳大利亚、美国已经出版了含水层补给管理国家指南^[17]。中国尚未结合本国实际制定出含水层补给用于饮用水风险评价指南和相关技术性指导文件,国内外多水源人工利用河道渗漏补给岩溶含水层的水量和水质研究案例仍然较少。济南市回灌补源工程的回灌水与当地岩溶水的物理化学性质不同。回灌水是多水源,一部分来自于黄河水,虽经过多次沉淀处理,但未经供水水厂处理,水质相对岩溶水较差;另外一部分来自卧虎山水库水,它的水质相对黄河水较好,但与岩溶水水质相比仍较差。两种水源的水回灌到地下都存在一定风险。因此,识别回灌工程水质风险源,对两种水源回灌时的源水、孔隙水和岩溶水分别进行监测,借鉴澳大利亚含水层补给管理指南进行风险残余评价,确定出高风险项并进行原因分析,对工程的可持续管理和长期运行具有重要意义。

1 研究区水文地质概况和玉符河多水源回灌工程概况

1.1 研究区水文地质概况

研究区选在济南泉域西部玉符河上游寨而头至南北大桥河段的强渗漏带,长 11.14 km。玉符河的河床和河漫滩以松散的第四系砂、卵砾石沉积物为主,厚度约 10 m,下伏岩溶裂隙发育,具有较好的渗漏条件(图 1)。卧虎山水库至东渴马为基岩非渗漏段,西渴马至罗而庄段为强渗漏河段。根据 1987 年的实测资料及收集的济南市水利局资料可知玉符河在西渴马和东渴马一带,张夏含水层的渗入量平均为 $6.5 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,寒武系上统含水层的渗入量为 $0.8 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;根据山东省水文局资料,1990 年 8 月 17—24 日,卧虎山水库向玉符河放水补源量为 $28 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,绝大部分渗漏,仅在睦里闸还有 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (含丰齐以下河道溢出的 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)的水量;2013 年经山东省地矿工程勘察院调查计算,玉符河寨而头—杨台(董庄)干流河道及支流大涧沟—展村段的总渗漏量为 $55 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

1.2 玉符河多水源回灌工程概况

玉符河多水源回灌补源工程有三部分组成:一是卧虎山水库放水工程,即将卧虎山水库的水直接放入玉符河中。卧虎山水库位于玉符河上游,控制流域面积 557 km^2 ,占流域总面积的 67%,总设计库容 $118.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中,大坝溢洪道的最大泄量为 $7\,030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,放水洞设计最大流量为 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。近年来,由于降水量少,水库蓄水位低,一直没有泄洪。二是地表水转化地下水工程,该工程通过泵站将玉清湖水库的黄河水提水调入玉符河上游进行回灌补源。2015 年建成的玉清湖水库泵站管道工程,在玉符河设有 6 个泄水口,设计日最大提放玉清湖水库的黄河水量达 $40 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。三是南水北调东线济南市工程,2015 年建成了济南市南水北调续建配套工程—卧虎山供水线路改造工程,可将田山电灌站黄河水和长江水通过济平干渠,经贾庄分水闸道,最后沿管道经玉符河输送到卧虎山水库调蓄后,按需求往下游放水或直接提水至河道泄水孔放水,设计能力 $10 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2014—2015 年为连枯年,2015 年卧虎山水库蓄水量较少。因此,水库放水少甚至无水可放,只能依靠提引黄河水补源。2015 年玉符河补水量统计表明,

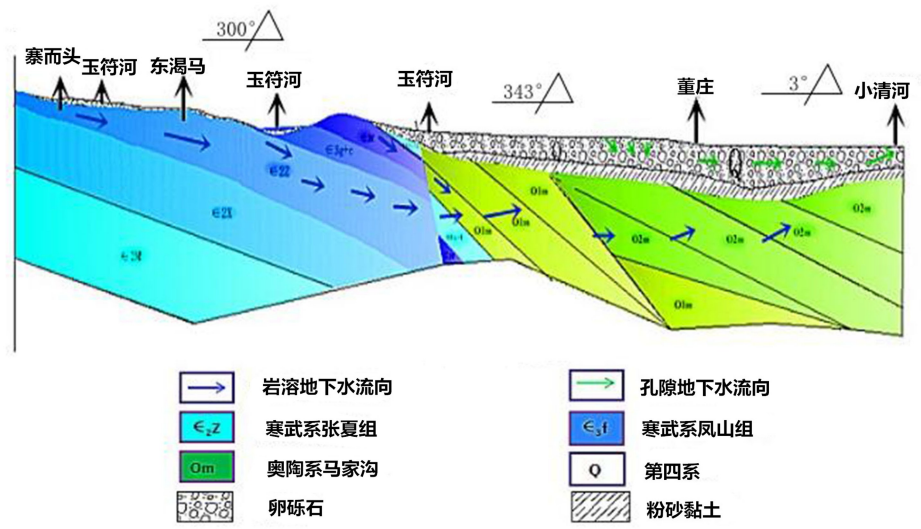


图 1 玉符河地质剖面示意图
Fig. 1 Sketch of geological profile of Yufuhe river

总补给量 4 347 万 m^3 , 其中黄河水回灌量占总回灌量的 32%, 该年玉符河补给量占多年平均泉域岩溶水总补给量的 64.7% (图 2)。

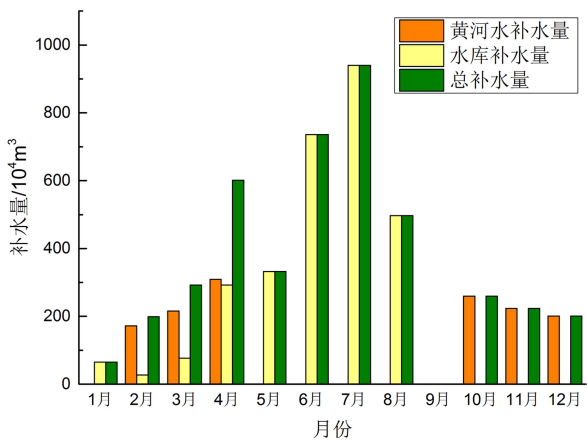


图 2 2015 年玉符河补水量统计图
Fig. 2 Recharging water quantity of Yufuhe river in 2015

2 评价方法

2.1 地下水背景值和水源水质调查及风险源识别

针对玉符河回灌工程建设后运行期水质风险评价, 需要调查了解回灌区域建设前地下水背景值和源水(黄河水和卧虎山水库水)的水质状况, 识别出源水对健康和环境可能造成的最大风险源, 对运行期进行水质监测, 评价回灌工程采取措施后的残余风险, 为工程长期运行提供管理对策。

2.1.1 玉符河沿岸与上游的地下水水质背景值调查
相关部门 2013 年 7 月在济南市地下水回灌补源

工程建成之前于玉符河自催马庄向下游筛选出沿岸有代表性的 5 个岩溶水及 2 个孔隙水监测点, 对主要的 15 项指标进行评价, 结果表明, 该区段岩溶水水质总体较好, 符合地下水质量 III 类标准, 但下游第四系孔隙水由于人为因素影响受到了中等污染。

2014 年 11 月确定了玉符河上游即寨而头至罗而庄段) 9 个长期水质监测井(主要集中在催马庄上游), 包括岩溶井 6 个(寨而头、东渴马、西渴马西东村、西西村、催马及罗而庄)和孔隙井 3 个(寨而头、东渴马及催马), 各监测井分布如图 3 所示:



图 3 玉符河强渗漏带地下水监测井分布图
Fig. 3 Distribution of groundwater monitoring wells in strongly permeate areas along Yufuhe river

2014 年 11 月 28 日分别从各监测井中人工取地下水水样,共 9 个,送至山东省分析测试中心检测 24 指标。根据检测结果,比照地下水质量 III 类标准(GB/T 14848—93)进行定量评价,发现西渴马西西村深井水样的亚硝酸盐、氨氮超标。此外,寨而头浅井的水样仅高锰酸盐指数超标。从整体来看,玉符河强渗漏带各岩溶井和孔隙井浊度均较低,符合地下水质量 III 类标准。

2.1.2 地表水补给水源水质风险源调查

依据有关部门 2014 年逐月对玉清湖水库和卧虎山水库地表水质监测结果以及 2014 年 11 月 28 日对玉清湖水库和卧虎山水库的取样检测,采用地表水质量 III 类标准或地下水质量 III 类标准对回灌水源的各项离子进行具体评价,分析结果如下:

(1) 黄河水超出地表水 III 类标准的指标有总氮、总磷;超出地下水 III 类标准的指标有 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、氯化物、总硬度、高锰酸盐指数、硫酸盐,共 6 项;未超过地下水 III 类标准,但超过当地岩溶水水质监测结果的指标有氟化物、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。

(2) 卧虎山水库超出地表水 III 类标准的指标有总氮、总磷;超出地下水 III 类标准的指标有 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、高锰酸盐指数、硫酸盐,共 3 项;未超过地下水 III 类标准,但超过当地岩溶水水质监测结果的指标主要为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。

2.2 确定玉符河水质监测指标并进行监测

根据上述水质监测资料的分析结果可知各超标物质的监测时长应有区别,对于地表水较多月份超标的物质需要长期监测,而在较少月份内超标的物质只需间隔监测。此外,为了研究地下水地球化学条件的动态变化,需现场取样监测如温度、电导率、pH、盐度、TDS 等理化指标。故初步确定项目运行期间监测指标有(1) 长期监测指标:pH、温度、电导率、电阻率、浊度、TDS、盐度、氧化还原电位、总硬度、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、氟化物、氯化物、硫酸盐、重碳酸盐、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ ;(2) 间断监测指标有 TOC、 BOD_5 、 COD_{Mn} 。

2014—2015 年对回灌补源水质的 22 项指标取样监测 22 次,包括黄河水和卧虎山水库水两种源水、浅层孔隙水、深层岩溶水,取样时间是 2014 年 12 月(3 次)、2015 年 1 月(2 次)、2 月(2 次)、3 月(2 次)、4 月(2 次)、5 月(2 次)、6 月(4 次)、7 月(5 次),取样地点是卧虎山水库、寨而头、东渴马、西渴马、催马等。

此外,还监测了黄河水和地下水中的痕量有机物。由于黄河水是途经 9 个省区的工业和城市生活污水接纳水体,根据已有黄河水水质微量有机物检测结果,选取了甲苯、666、DDT、2,4,6-三氯苯酚、2,4-二硝基苯酚、多环芳烃等有机物作为检测项。

2.3 风险评价方法

黄河水尽管泥沙含量高、上中游污染重,但经过引黄沉沙池沉沙和玉清湖水库调蓄,水质总体较好;卧虎山水库水拦蓄南部山区地表径流,工业污染源较少,水质相对较好。玉符河上游强渗漏带地下水埋深约为 40 m 左右,其中河道覆盖有 10~30 m 的砂卵石层,下伏张夏灰岩。它们对某些风险污染物有一定的消减作用,保护了回灌系统。此外,回灌采用小流量周期性放水,河道处于干湿交替状态,有利于包气带对某些污染物的降解。回灌水源是通过河道下渗回灌到含水层,水流在河道流动过程中部分有机物会挥发。以上对减少运行期风险污染源具有积极的作用。但是,整个回灌系统水质仍然存在残余风险,因此,以源水污染风险项为主线,对比地下水质量 III 类标准,结合地表水环境质量类标准,分别对运行期孔隙水和岩溶水中残余风险进行评价。该项风险评价借鉴澳大利亚 MAR 准则(NRMMC—EPHC—NHMRC 2009a),结合该项目运行期的特点,针对特定的风险源,采用简化的半定量分析法来评价影响人类健康与环境的各项污染物,包括无机化合物、盐度、营养物、有机化合物、浊度与颗粒物、污染物在裂隙岩和岩溶含水层中的迁移、含水层和地下水生态系统^[18-19]。半定量分析主要采用指标的标准指数进行分析,各项指标的标准指数是指标含量的均值与标准值(地表水 III 类标准或地下水 III 类标准)的比值,小于 1 为达标,大于 1 超标。

3 运行期监测结果与分析

3.1 运行期风险源监测结果

黄河水和卧虎山水库水补源期间源水和地下水水质评价结果分别如表 1、表 2 所示:

黄河水和地下水痕量有机物监测结果显示,只在黄河水中发现多环芳烃中的萘($1.32 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、二氢萘($1.37 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、芴($3.47 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、荧蒽($2.51 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),但均满足生活饮用水卫生标准,而地下水中所有检测项均未检出。

表 1 以黄河水为补给水源的源水和地下水监测指标变化

Table 1 Changes of monitoring indexes when Yellow River water recharges aquifers

指标	黄河水				孔隙水(3眼)				岩溶水(6眼)				地表水	地下水
	样本数量	最大值	最小值	均值	样本数量	最大值	最小值	均值	样本数量	最大值	最小值	均值	Ⅲ类标准	Ⅲ类标准
物理性质														
pH	10	8.408	7.479	8.210	18	7.823	7.153	7.495	36	8.056	7.076	7.227	6~9	6.5~8.5
溶解氧/mg·L ⁻¹	10	13.57	9.21	10.78	18	13.62	4.16	9.03	36	13.80	6.80	10.18	5	
浊度/NTU	10	7.5	2.0	4.2	18	16.9	1.6	5.0	36	10.5	0.5	2.8		3
总硬度/mg·L ⁻¹	8	320.4	302.6	308.5	6	338.2	298.4	320.8	12	534.0	306.0	366.5		450
氧化还原电位/ mV	10	-63.4	-87.5	-76.1	18	-16.3	-69.6	-33.2	36	-6.8	-49.3	-21.9		
TDS/mg·L ⁻¹	10	964	901	825	18	808	600	683	36	1073	504	732		
总碱度	8	4.1	2.0	2.8	6	4.3	3.2	3.7	12	5.1	3.2	3.9		
主要离子/mg·L ⁻¹														
钙	8	84	66	76	6	104	86	96	12	182	92	115		
镁	8	37.8	22.5	28.8	6	25.6	17.3	20.3	12	28.1	15.4	20.6		
钠	8	80.0	30.8	48.3	6	52.8	19.1	34.1	12	53.1	18.5	28.7		
主要离子/mg·L ⁻¹														
钾	8	5.30	3.60	4.35	6	2.70	1.75	2.41	12	3.20	1.38	2.21		
氯	8	119.0	40.0	74.8	6	70.0	30.0	45.5	12	107.5	28.0	56.2	250	250
氟	8	0.56	0.25	0.39	6	0.30	0.13	0.21	12	0.40	0.16	0.23	1.0	1.0
硫酸根	8	290	185	233	6	340	130	224	12	300	113	183	250	250
碳酸氢根	8	195.2	146.4	176.9	6	256.2	195.2	221.2	12	310.1	195.2	232.5		
营养物/mg·L ⁻¹														
NH ₄ -N	8	0.100	0.050	0.074	6	0.020	0.002	0.010	12	0.020	0.003	0.014	1.0	0.2
NO ₂ -N	8	0.018	0.005	0.010	5	0.001	5	0.000	4	0.000	8	0.001	9	0.02
NO ₃ -N	8	2.4	2.0	2.2	6	4.5	1.3	2.8	12	9.7	1.7	4.0	10	20
总氮	8	4.20	3.78	3.97	6	6.23	2.18	4.24	12	37.30	2.02	7.45	1.0	
有机化合物/mg·L ⁻¹														
BOD ₅	8	2.7	1.5	2.1	6	1.8	1.4	1.5	12	1.9	1.4	1.6	4	
高锰酸盐指数	8	3.54	2.35	2.84	6	1.33	0.95	1.11	12	1.29	0.86	1.13	6	3
总有机碳	8	4.8	3.3	4.3	6	3.8	1.4	2.3	12	3.5	1.0	2.3		

3.2 运行期风险残余评价分析

3.2.1 运行期黄河水回灌

工程运行中,黄河水补源期间监测结果表明,孔隙水中平均浊度标准指数是 1.7,相比源水有所升高,岩溶水中平均浊度标准指数是 0.93,较孔隙水有所改善。分析认为,当地地下水浊度较低,由于源水

平均浊度标准指数是 1.4,已超过了地下水Ⅲ类标准,是孔隙水中悬浮物的主要来源,其次部分来自砂卵砾石孔隙中的黏土矿物。由于黄河水中的细颗粒悬浮物吸附小分子的痕量有机物,砂卵砾石层对细颗粒的悬浮物截留效果有限,所以对健康和环境而言,浊度仍然是残余的风险项。

表 2 以卧虎山水库水为补给水源的源水与地下水监测指标变化

Table 2 Changes of monitoring indexes when water of Wohushan reservoir recharges aquifers

指标	卧虎山水库水				孔隙水(3 眼)				岩溶水(6 眼)				地表水	地下水
	样本数量	最大值	最小值	均值	样本数量	最大值	最小值	均值	样本数量	最大值	最小值	均值	Ⅲ类标准	Ⅲ类标准
物理性质														
pH	22	8.395	7.538	7.786	18	7.920	7.225	7.683	36	7.848	7.044	7.471	6~9	6.5~8.5
溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	22	12.4	8.42	10.73	18	8.67	3.13	5.62	36	9.53	5.25	7.32	5	
浊度/NTU	22	15.7	3.0	7.3	18	8.8	1.5	3.3	36	6.6	0.2	1.3		3
总硬度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	14	249.2	160.2	222.5	12	338.2	267.0	304.6	24	498.4	249.2	335.2		450
氧化还原电位/mV	22	-47.4	-82.8	-69.7	18	-21.2	-73.5	-54.6	36	-13.6	-60.8	-34.6		
TDS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	22	628	513	567	18	805	621	726	24	1262	609	781		
总碱度	14	3.6	1.2	2.3	12	4.5	3.2	3.8	24	5.6	3.0	4.1		
主要离子/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$														
钙	14	90	46	70	12	120	73	100	24	190	82	116		
镁	14	32.5	8.5	20.4	12	46.3	7.1	23.0	24	52.2	2.1	16.6		
钠	14	33.1	26.6	28.9	12	46.3	15.2	31.2	24	49.4	16.2	31.6		
钾	14	5.24	3.72	4.29	12	4.67	1.96	2.92	24	3.82	1.18	2.42		
主要离子/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$														
氯	14	30.0	22.0	26.8	12	80.1	20.0	38.5	24	85.0	15.0	40.5	250	250
氟	14	0.30	0.20	0.24	12	0.52	0.27	0.37	24	0.50	0.20	0.32	1.0	1.0
硫酸根	14	270	145	188	12	320	135	211	24	270	90	164	250	250
碳酸氢根	14	219.6	73.2	142.9	12	274.5	195.3	232.5	24	341.6	183.1	247.3		
营养物/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$														
$\text{NH}_4\text{-N}$	14	0.320	0.072	0.228	12	0.470	0.200	0.294	24	0.464	0.020	0.270	1.0	0.2
$\text{NO}_2\text{-N}$	14	0.011	0.000 1	0.002 5	12	0.030 0	0.001 5	0.013 2	24	0.028 0	0.000 5	0.017 1		0.02
$\text{NO}_3\text{-N}$	14	14.0	0.3	4.4	12	7.5	2.3	4.5	24	13.2	1.8	5.3	10	20
总氮	14	8.22	3.15	5.02	12	7.52	3.34	5.79	24	48.2	2.60	9.82	1.0	
有机化合物/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$														
BOD_5	14	6.0	3.4	4.2	12	2.7	1.5	2.1	24	2.8	1.7	2.1	4	
高锰酸盐指数	14	4.12	2.04	3.15	12	1.22	0.72	0.96	24	1.32	0.70	1.02	6	3
总有机碳	14	6.9	2.8	3.8	12	2.9	2.0	1.8	24	3.0	1.2	1.9		

硫酸盐的平均含量在孔隙水中标准指数是 0.9, 岩溶水中是 0.73, 皆符合地下水Ⅲ类标准, 孔隙水中硫酸盐很接近Ⅲ类标准值, 源水中平均标准值 0.93, 孔隙水和岩溶水背景值平均的标准指数约为 0.4。含水层对于源水的硫酸盐含量确实起到一定减少的作用, 且岩溶水稍优于孔隙水。分析认为, 地下水中硫酸盐主要来自源水, 尽管没有超标, 但是有潜在的残余风险。

高锰酸盐指数的标准指数源水是 0.95, 孔隙水降至 0.37, 岩溶水 0.38。总有机碳平均含量由源水 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 到孔隙水和岩溶水均降低到 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解氧平均含量由源水 $10.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别降到 $9.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。分析认为砂卵

砾石层对有机物具有一定的降解作用, 但是岩溶含水层对有机物没有降解作用, 仅用于储存和输送地下水。

氯离子平均含量从源水 $74.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 到孔隙水 $45.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和岩溶水 $56.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 背景值孔隙水均值 $26.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 岩溶水 $30.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。尽管氯离子没有超过地下水Ⅲ类标准, 但是黄河水中含量是地下水含量的 2 倍多, 回灌后, 无论孔隙水还是岩溶水, 该值均分别上升了 70 % 和 84 %。因此认为氯离子对地下水有潜在残余风险。

另外, 由于岩溶含水层发育且视流速大, 防污性能弱, 超标污染物一旦进入含水层, 极易迁移, 故将污染物在含水层中的迁移定为高风险项。

3.2.2 运行期卧虎山水库水回灌

工程运行中,由卧虎山水库水补源期间监测数据可知孔隙水平均浊度的标准指数是1.1,相比源水中的标准指数2.4有所降低,但仍然超出地下水Ⅲ类标准,在岩溶水中的标准指数是0.43。由于浊度的背景值较低,分析孔隙水中的悬浮物主要来自源水。虽然含水层对浊度有一定的改善作用,但源水和孔隙水中浊度均超过地下水Ⅲ类标准,卧虎山水库中的悬浮物不同于黄河水,不能吸附痕量有机物,仅对含水层产生堵塞,所以仍然有一定的残余风险。

硫酸盐平均含量的标准指数在孔隙水中是0.84,源水中是0.75,岩溶水中是0.66,其平均含量皆满足相应水质标准,但孔隙水的硫酸盐与标准值相接近,故硫酸盐存在残余风险。

氨氮的平均含量的标准指数在源水中是1.14,孔隙水中是1.47,岩溶水中是1.35,皆超出地下水质量Ⅲ类标准。亚硝酸盐氮和硝酸盐氮在源水、孔隙水到岩溶水中虽然都符合标准,但平均含量呈升高趋势,总氮从源水、孔隙水到岩溶水也是呈升高趋势,分析认为农田施肥量增加^[20]、三氮的转化和有机氮的氨化作用起了一定的作用。针对水环境而言,将营养物定为残余风险项。

有机化合物中高锰酸盐指数平均含量的标准指数在源水中是1.05,孔隙水中是0.32,岩溶水中是0.34,其变化与原因是砂卵砾石层对有机物具有一定的降解作用,但是岩溶含水层对有机物没有降解作用。此外, BOD_5 在源水中的平均含量是 $4.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,略超出地表水环境质量Ⅲ类标准。虽然高锰酸盐指数在源水中略超标,但回灌后两者在孔隙水和岩溶水中的平均含量皆符合标准,故有机物的风险较低。

另外,同黄河水补源情况相同,污染物在含水层中的迁移仍被定为高风险项。

综合分析结果可知在不同水源回灌补给地下水过程中,浊度和硫酸盐、污染物在含水层中的迁移皆为高风险控制项。此外,黄河水补源还需控制盐度指标,而卧虎山水库水补源还需控制营养物。

4 结论与建议

(1)风险残余评价结果表明浊度、硫酸盐和污染物在含水层中的迁移为黄河水和卧虎山水库水回灌补源期间共同的高风险项。此外,黄河水补源过程主要还存在盐度风险,而卧虎山水库水补源过程营养物也存在风险。

(2)各项风险残余的原因如下:①浊度:源水中浊度平均含量的标准指数太高;②硫酸盐:背景值中硫酸盐的含量特别低,但是在源水和回灌后孔隙水、岩溶水中的含量和标准值太接近;③污染物在含水层中的迁移:岩溶含水层发育且视流速大,防污性能弱,超标污染物一旦进入含水层,极易迁移;④盐度:黄河水中氯离子相比地下水背景值含量太高;⑤营养物:农田施肥量增加、三氮的转化和有机氮的氨化作用。

(3)综合分析水质评价结果,提出以下建议:①充分利用玉符河河道中厚层卵砾石与水量优化补源放水方案,来减少细小颗粒引起的含水层的堵塞和痕量有机物对岩溶水水质的影响,这方面的具体操作还需进一步研究。②由运行期风险残余评价结果可知并非回灌量越大,玉符河回灌补源效果越好,连续补源可能会导致含水层中一些潜在风险源累计。因此,需根据补源期间源水和地下水水质的实时监测结果来严格控制回灌补源量,控制黄河水回灌总量即回灌量占区域岩溶水资源量的比例,需要进一步监测黄河水回灌对岩溶水水质影响的长期效果。③回灌要与岩溶水的开采相结合,合理控制地下水回灌和开采的时间间隔、开采量、回灌水在含水层的停留时间及回采效率。

参考文献

- [1] Asano T, Cotruvo J A. Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations[J]. *Water Research*, 2004, 38(8):1941-1951.
- [2] 韩再生. 为可持续利用而管理含水层补给:第四届国际地下水人工补给会议综述[J]. *水文地质工程地质*, 2002, (6): 72-73.
- [3] Ayuso Gabella, Page N, Dillon D, et al. Operational Residual Risk Assessment for the Bolivar ASR recycled water project [C]//CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship, 2010.
- [4] Blue Lake Management Committee (BLMC). The blue lake management plan[R]. South East Water Kingswood, South Australia. In: *Management of Aquifer Recharge for Sustainability* (Ed. P Fox). Catchment Management Board Mount Gambier, 2009.
- [5] Dillon P, Hickinbotham M, Pavelic P. Review of international experience in injecting water into aquifers for storage and reuse [J]. *Groundwater Papers*, Preprints of Papers, 2010: 13.
- [6] Joanne Vanderzalm, Peter Dillon, Steve Marvanek, et al. Over 100 years of drinking stormwater treated through MAR: assessing the risks of stormwater recharge on the quality of the Blue Lake[C]. *Proceedings of ISM AR6*, 2006: 616- 625.
- [7] Turner J V, Allison G B, Holmes J W. The water balance of a small lake using stable isotopes and tritium[J]. *Journal of Hydrology*, 1984, 70(1-4):199-220.
- [8] 曲士松. 中国北方地下水可持续管理[M]. 郑州:黄河水利出版

- 社 2008: 22-27.
- [9] 云桂春, 皮运正, 胡俊. 浅谈再生污水地下回灌的健康危害风险[J]. 给水排水, 2004, 30(4): 7-10.
- [10] 云桂春, 成徐州, 等. 水资源管理的新战略: 人工地下水回灌[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 158-165.
- [11] 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: 164-165.
- [12] 朱中竹, 王维平, 蒋颖魁, 等. 屋面雨水回灌裂隙岩溶水岩作用实验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 272-278.
- [13] 徐巧艺, 周亚群, 王维平, 等. 屋面雨水回灌裂隙岩溶水工程风险评估[J]. 中国岩溶, 2015, 34(6): 631-641.
- [14] 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[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 325-330.
- [15] 曹彬, 王维平, 韩延成. 利用澳大利亚含水层补给管理国家指南对黄河地下水库的评估研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(12): 1-5.
- [16] 周亚群. 屋面雨水回灌裂隙岩溶含水层风险评估[D]. 山东济南: 济南大学, 2014.
- [17] 王维平, Dillion P J, Vanderzalm J. 中国—澳大利亚含水层补给管理新进展[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [18] 杨昱, 廉新颖, 马志飞, 等. 再生水回灌地下水环境安全风险评价技术方法研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1806-1813.
- [19] Page D, Vanderzalm J, Barry K, et al. Operation residual risk assessment for the Salisbury stormwater ASTR project[R]. CSIRO: Water for a Health Country Flagship Report, 2009.
- [20] 沈杨. 浑河傍河区地下水水化学特征及氮污染源同位素识别[D]. 中国地质大学(北京), 2013.

Assessment of water quality risk from karst aquifer recharge with multi-source water in the Yufuhe river, Ji'nan

LI Fengli¹, WANG Weiping¹, XU Qiaoyi², WU Shen³, ZHANG Zhengxian¹

(1. School of Resource and Environment, University of Ji'nan/ Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Ground Numerical Simulation and Contamination Control, Ji'nan, Shandong 250022, China;

2. Ji'nan Qingyuan Water Group Co. LTD, Ji'nan, Shandong 250011, China;

3. Ji'nan Management Office of Wohushan Reservoir, Ji'nan, Shandong 250115, China)

Abstract Ji'nan is well known for Spring City, while facing huge challenges of spring protection and security of water supply. The aquifer recharge with multi-source water is one of the effective measures to solve these problems. However, the quality of source water is still poorer than karst water, which would caused some risk of health and safety. Comparing the standard of groundwater quality and the background value of karst water quality, this work chose the risk monitoring indicators that exceed the standard in surface water sources or are inferior to background values. And adopting the Australian Guidelines of MAR, we assessed the water quality risk of the aquifer recharge with multi-source water in the Yufuhe river. In 2015, monitoring and index analysis were performed to the water quality of source water, pore well water and karst deep well water when Yellow River water and Wohushan reservoir water recharging the aquifers many times. The results show during the Yellow River water recharging, respectively in source water, pore water and karst water, the standard indexes of average turbidity are 1.4, 1.7 and 0.93, the standard indexes of sulfate's average content are 0.93, 0.9 and 0.73 and although the content of chloride ion does not exceed the groundwater class III standard, it in the source water content is more than 2 times the groundwater content; during the Wohushan reservoir water recharging, respectively in source water, pore water and karst water, the standard indexes of average turbidity are 2.4, 1.1 and 0.43, the standard indexes of sulfate's average content are 0.75, 0.84 and 0.66 and the standard indexes of ammonia nitrogen's average content are 1.14, 1.47 and 1.35. We draw conclusion that the turbidity, sulfate and the movement of pollutants in the aquifers are at critical points for the whole Yufuhe aquifer recharge project. In addition, the risk of salinity should receive attention when the Yellow River water is used as the recharge source. Similarly, the risk of nutrient is also a concerned issue when the Wohushan reservoir water is the recharge source. Based on the above analyses, this paper offers some suggestions, such as limiting the proportion of karst water resources.

Key words managed aquifer recharge, multi-source water, karst aquifer, risk assessment of water quality

(编辑 吴华英)