

邹胜章,朱丹尼,李录娟,等. 溶井微污染水供水就地处理技术研究[J]. 中国岩溶,2015,34(4):309-313.

DOI:10.11932/karst20150401

溶井微污染水供水就地处理技术研究

邹胜章,朱丹尼,李录娟,卢海平,周长松

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室/

国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:溶井是西南岩溶区主要的分散式供水方式。本文在对典型地区溶井水污染特征分析基础上,通过对现有分散供水水处理工艺原理的分析,提出了溶井供水的水污染防治措施,并结合中试试验,对溶井快渗池的设计思路、设计参数、水处理工艺以及施工中的注意事项进行了详细说明。试验表明,溶井在采取水处理措施后,出水浊度均低于5度,微量有机物去除率大于35%,氨氮可削减60%以上,细菌总数最大可截留95%;溶井快渗池工艺在溶井水处理过程中不需要添加任何药剂,避免了混凝剂和消毒剂对水质产生的副作用和卫生问题,出水水质主要指标基本达到生活饮用水卫生标准。

关键词:地下河;溶井;分散供水;人工快渗;慢滤;就地处理

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2015)04-0309-05

水柜、水窖和溶井是西南岩溶区3种主要的分散供水模式^[1-2],溶井作为岩溶地下水排泄区最常见的分散供水设施,稳定的水源缓解了西南贫困山区人畜饮水困难。现有的溶井多采用直接取水方式供水,没有采取任何工程防治措施,导致溶井供水水质得不到有效保证。溶井水一旦受到污染,常常会引发霍乱、伤寒、痢疾及其他许多疾病,对当地居民的身体健康造成危害^[3],对供水溶井水质进行合理的就地处理可有效防范这些疾病的发生。

对于地下水原位修复,根据修复机理不同,可分为物理修复、化学修复、生物修复和可渗透反应格栅修复技术^[4-5]。其中,可渗透反应格栅技术(PRB)由于所填充的活性介质种类多样,可用于修复多种污染物污染的地下水,该技术具有处理时间短、不破坏生态环境、安装操作简便、能耗低、处理成本低等特点。PRB技术作为污染地下水的原位修复技术,其主要优点是不需要泵抽和地面处理系统,且反应介质消耗很慢,有几年甚至几十年的处理能力,除了需长期监

测外,几乎不需运行费用,节省了能源消耗。所以,PRB是一种很有前景的污染治理技术。但PRB的建造成本较高,且更适用于松散孔隙介质,在基岩含水层的应用受到了限制。另外,为方便家庭使用,市场还开发出了各种原水处理装置,适用于家庭管道式供水的处理。但对于西南贫困山区家庭而言,每户安装一个原水处理装置也是一项成本很高的投入。因此,开发出一种针对溶井供水的简单、有效的原位水处理方法十分必要。

1 溶井供水及其污染特征

在西南岩溶谷地、岩溶平原等的径流排泄区,常常发育有与地下河管道连通的天窗;因地势较低,地下河水可从天窗中涌出。当地居民因地制宜地将这些天然的天窗进行简单修整,作为村民的饮用水井,称为溶井。为方便使用和保护水质,溶井多采用多级串联式供水,即1个主水井后串联1~2个用水池(图

基金项目:国土资源部地调项目(1212011121166);973计划项目(2011CB201001);国家科技支撑计划项目(2012BAJ11B04)及国土资源部公益性行业专项(201211082)

第一作者简介:邹胜章(1969—),男,博士,研究员,主要从事水资源与环境工程方面的研究工作。E-mail:zshzh@karst.ac.cn。

收稿日期:2015-05-10

1)。主水井用于人的生活饮用,地下水从主水井流出后进入第一个用水池,作为生活洗涤用水;接下来的第二个用水池则用于杂物清洗、浇灌及牲畜饮用。



图 1 多级供水溶井

Fig.1 Multi-level natural ponors for water supply in karst areas

大量的调查表明^[6-8],西南岩溶区分散供水水质多表现为微污染,污染类型主要为生物型污染和物理型污染(表 1),化学型污染多出现在城镇区及周边地带,但微量有机污染物的检出率越来越高,污染物种类也越来越多(表 2)。

对广西 46 个供水人口超过 800 人的溶井供水水质监测表明,溶井水质以生物型污染为主、物理型污染次之,且在枯水期与丰水期水质变化明显(表 1):大雨期间,水的浊度、色度显著上升,其它离子浓度因稀释而略有下降;枯水期水质略好于丰水期。虽然溶井水中大多数无机盐离子浓度未超过饮用水卫生标准,但个别离子的浓度明显偏高,如 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 。浊度、色度等是由当地水土流失造成的。雨季总硬度偏高,主要是因为进入地下的地面径流中 SS 和 TDS 偏高,尤其是 HCO_3^- 引起的暂时硬度偏高;硝酸盐超标是由周边农田施肥而导致的;细菌总数和大肠菌群则是因人蓄粪便等随地表径流通过落水洞等直接进入地下水中引起的,并导致 COD 在丰水期升高;虫和藻类的大量繁殖是水体流动性差和富营养化的结果。

表 1 广西典型溶井水质

Table 1 The water quality of typical karst wells in Guangxi

指标	枯水期		丰水期		生活饮用水卫生标准 (GB5749-2006)
	范围值	合格率/%	范围值	合格率/%	
色度/度	6.4~25.7	70	12.5~31.5	30	20
浊度 / NTU	1.4~4.8	100	9.7~34.5	0	5
肉眼可见物	藻类、虫	0	藻类、虫	0	无
pH	6.74~8.17	100	6.88~7.71	100	6.5~9.5
COD _{Mn} / mg/L	0.9~4.0	100	1.8~5.5	80	5
NO ₃ -N/ mg/L	1.85~12.65	100	4.70~21.75	80	20
SO ₄ ²⁻ /mg/L	3.12~95.53	100	3.27~104.76	100	300
总硬度(以 CaCO ₃ 计,mg/L)	180.29~429.50	100	204.5~570.10	80	550
总大肠菌群/MPN/100 mL	7~ >1 600	0	20~ >1 600	0	不得检出
细菌总数/cfu/mL	5~4 000	10	260~无法计数	10	500

在桂西 10 个典型溶井中,从检测的 76 种有机物内被检出的有机化合物多达 23 种(表 2),其中二氯甲烷、正丙苯、异丙苯、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯、异丁基苯在所有点全部检出,苈、菲检出率高达 80%,间+对二甲苯和萘烯的检出率均为 50%。这些有机化合物都在 129 种 EPA 优先控制的污染物名

单之内,说明西南岩溶山区分散供水水源已不同程度地受到了微量有机物的污染。

西南岩溶山区经济贫困、生活方式落后,有机污染物主要来源于农药及各类涂料、电子工业垃圾等;机动车路面漏油也是引起微量有机污染物增加的一个重要因素。

表 2 桂西典型溶井水主要有机污染物检出表(单位:μg/L)

Table 2 Representative analytical results of major organic pollutants from natural karst wells in the western Guangxi (unit: μg/L)

编号	二氯甲烷	间十对二甲苯	异丙苯	正丙苯	1,3,5-三甲苯	1,2,4-三甲苯	异丁基苯	萘烯	芴	菲	艾氏剂
No. 1	1.72	<0.30	0.93	0.87	0.86	0.82	0.67	<3.0	<2.0	<3.5	0.56
No. 2	2.87	0.78	0.27	0.28	0.32	0.32	0.33	17.3	23.2	23.3	<0.40
No. 3	2.65	0.78	0.27	0.29	0.32	0.32	0.33	<3.0	23.2	14.2	<0.40
No. 4	2.77	0.39	0.28	0.28	0.32	0.32	0.33	<3.0	9.4	11.3	0.49
No. 5	1.94	0.78	0.27	0.28	0.31	0.32	0.33	<3.0	20.3	15.7	<0.40
No. 6	1.67	0.78	0.27	0.28	0.31	0.32	0.33	15.8	22.8	21.9	<0.40
No. 7	1.70	<0.30	0.27	0.28	0.31	0.32	0.33	15	26.2	16.9	0.71
No. 8	2.20	<0.30	0.93	0.88	0.86	0.82	0.67	17.5	22.5	17	<0.40
No. 9	2.60	<0.30	0.27	0.28	0.31	0.32	0.33	<3.0	<2.0	<3.5	<0.40
No. 10	1.76	<0.30	0.27	0.28	0.31	0.32	0.33	15.6	26.6	10.8	<0.40

2 溶井水就地处理工艺原理

2.1 溶井水就地处理技术要求

受应用对象的限制,溶井微污染水的就地处理工艺必须具有建设和运行成本低、处理效率高、管理方便等优点。为此,根据溶井水质特点,应用 PRB 技术方法,结合粗滤慢滤组合工艺^[9-10]和人工快渗处理系统(Constructed Rapid Infiltration,简称 CRI)^[11]工艺原理,开发出了一套适合于处理西南岩溶区溶井供水水质的就地处理技术——溶井快渗反应池。

粗滤慢滤组合净水工艺由国际供水和卫生咨询中心与一些发展中国家合作开发^[10],模拟大自然含水层砾石和砂层的净水机理,属于自然净化过程;具有工艺简单,技术要求低,管理方便,不投加药剂,运行成本低,并有良好去除有机污染物的能力,适合于乡村水厂使用,但不能作为原位处理。慢滤池是保证供水水质的关键工序,其原理是通过滤层表面的微生物膜及其分泌酶,实现对水中胶体物质的凝聚、截留和降解作用。

CRI 技术采用渗透性能良好的天然介质作为主要渗滤材料,对受污河流水质的净化改善具有较好的效果。处理受污染的河水,水力负荷为 2 m/(m²·d)以上,出水水质可达国家地表水 III 类水质标准,可作为饮用水源水^[12-13]。

粗滤慢滤组合净水工艺和 CRI 技术均具有建设成本低、处理效率高、维护管理方便的特点,尽管不属于原位水处理技术,但其工艺原理值得借鉴。将其工艺原理与 PRB 技术相结合改进而成的溶井快渗反应池技术将能满足西南岩溶区溶井水就地处理要求。

2.2 溶井快渗反应池结构

无论是 PRB 系统还是粗滤慢滤系统及 CRI 系

统,其设计时采用的是水平流动或垂直下渗流动的水动力结构模式;溶井的水流动方式是垂直向上,因而不能照搬现有各系统的结构模式;而且,为节省成本和方便施工,也不能进行大开挖构筑反应渗透墙或把水抽上地面建造反应池。

本次设计的溶井水处理池结构充分利用溶井上流式水动力特征及其所处的坚硬的碳酸盐岩基底,以扩大的天窗口作为渗透反应池,就地取材,依地势而建(图 2)。借鉴粗滤慢滤系统和 CRI 系统的成功设计思路,渗透反应池内根据水质特点填制相应的滤料:溶井底部为一层 0.6 m 厚的灰岩砾石和中粗砂混合层,填料粒径由下向上逐渐减小,对地下水进行初步的机械过滤,可截留水中 90%以上的粗颗粒^[14],并对水中的 P 有一定的除去效果^[15];在机械过滤层之上,是一层由粉细砂及约 50%的活性炭与高效生物陶粒和少量活性矿物质填料组成的主滤层,厚 0.8 m;在该滤层内可截留 90%以上的微生物^[14],并可通过生物化学作用除去部分有机污染物^[14,16];顶部盖层与底部的结构相反,厚度 0.4 m。

同时,还需在溶井周边设置一定宽度的水泥地坪防护带和防渗排水沟,并对水池池底和池壁采取防漏措施,以保证周边污水不渗入溶井内,以及在大雨期间地表水流不会淹没溶井。

2.3 溶井快渗反应池原理

底部滤层具有较大的渗透系数,属于快渗层;它主要通过吸附和沉淀降低原水的浊度。中部滤层是保证出水水质的关键段,类似于慢滤池和 CRI 系统中的人工快渗池生化反应层;过滤机理以深层过滤为主,由于砂粒较细,机械过滤、沉淀和生物氧化均起重要作用,因而能很好地去除水中的细菌、病毒、嗅、味与色度,降解部分有机物、净化水质。

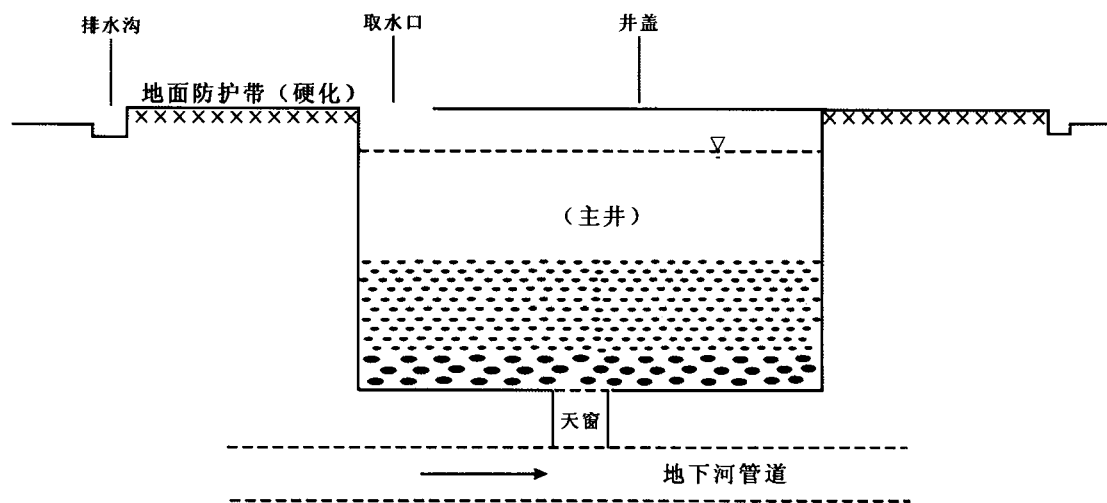


图 2 溶井供水水处理工程设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the design of water treatment process in natural well

Torgas 认为^[17],当颗粒直径与滤料直径之比大于 5.5×10^{-2} 时,机械筛滤是重要的;当颗粒直径与滤料直径之比为 $4.0 \times 10^{-2} \sim 5.5 \times 10^{-2}$ 时,机械筛滤所占的比必须考虑;当颗粒直径与滤料直径之比小于 4.0×10^{-2} 时,机械筛滤可忽略不计。众多的运行实例表明,只要温度在 10℃ 以上,滤层厚度不小于 600 mm,几乎所有的细菌和病毒都能在砂滤池中被去除。

3 溶井水处理试验及结果分析

在室内模拟试验基础上,根据前述设计,在湖南新田建造了一小型溶井快渗反应池开展中试试验。

该溶井位于溶丘谷地边缘,流量 0.3~1 L/s,供水人口约 200 人,为典型的三级串联式结构;溶井水质具有典型的微污染特征,主要受到微生物污染(表现为细菌总数和粪大肠菌群超标,并伴生蓝藻),雨季浊度、氨氮和硝酸盐氮偏高,硝酸盐氮偶有超标现象。建造的反应池为 2 m×2 m 的方形,总深度 3.0 m。

近 1 年的监测结果显示(表 3),溶井在采取水处理措施后,溶井水浊度均低于 5 NTU,微量有机物去除率大于 35%,氨氮可削减 60% 以上(但氨氮的削减导致硝酸盐氮略有上升),细菌总数最大可截留 95%;出水水质主要指标基本达到生活饮用水卫生标准,表明溶井水处理设施运行良好,具有较好的水质防护能力。

表 3 溶井水处理效果对比

Table 3 A comparison of treatment effects of natural wells in karst areas

	枯水期			丰水期		
	地下河水	溶井水	去除率/%	地下河水	溶井水	去除率/%
色度/度	7.5	3.1	59	18.6	7.6	59
浊度/NTU	2.8	2.1	25	26.8	4.3	84
pH	7.01	7.31	/	7.12	7.37	/
COD _{Mn} /mg/L	3.2	1.8	44	5.2	2.9	44
NO ₃ -N/mg/L	6.23	6.45	略有升高	13.3	13.82	略有升高
NH ₃ -N/mg/L	0.85	0.4	53	1.1	0.43	61
Cl ⁻ /mg/L	76.4	76.2	/	117.5	117.5	/
细菌总数/cfu/mL	3 100	320	90	9 500	470	95
二氯甲烷/μg/L	12.03	7.78	35	16.12	9.81	39
苄/μg/L	18.65	9.35	50	12.54	8.15	35
六氯苯/μg/L	0.82	0.53	35	0.78	0.49	37

4 结 论

中试结果显示,应用 PRB 技术理论,结合粗滤慢滤和人工快渗处理工艺原理开发的溶井快渗反应池对微污染溶井水具有较好的处理效果,出水水质主要指标基本达到生活饮用水卫生标准。在溶井水处理过程,溶井快渗反应池中不需要添加任何药剂,避免了混凝剂和消毒剂对水质产生的副作用和卫生学问题;且溶井快渗反应池不仅具有工艺简单、管理方便的特点,其建设和运行成本也相对低廉。

目前,溶井快渗反应池工艺仅仅是处于中试试验阶段,运行时间短,还未对系统的抗冲击负荷进行测试,填料的使用寿命和长期使用效果亦尚不清楚;同时,对总氮的减少效果不理想,在削减氨氮的同时,更容易导致硝酸盐氮超标。溶井快渗反应池工艺还有待进一步改进和完善。

参考文献

- [1] 邹胜章,陈宏峰,梁彬,等.西南峰丛山区分散供水模式及存在的问题[J].中国岩溶,2006,25(1):12-17.
- [2] 王宇.西南地区岩溶水源地类型及开发技术条件[J].中国岩溶,2009,28(4):370-374.
- [3] Jensen P K, Ensink H J, Jayasinghe G, et al. Domestic transmission routes of pathogens: the problem of in-house contamination of drinking water during storage in developing countries[J]. Tropical Medicine & International Health, 2002, 7(7): 604-609.
- [4] 柏耀辉,张淑娟.地下水污染修复技术:可渗透反应墙[J].云南环境科学,2005,24(4):51-54.
- [5] 井柳新,程丽.地下水污染原位修复技术研究进展[J].水处理技术,2010,36(7):6-9.
- [6] 邹胜章,李兆林,陈宏峰,等.西南岩溶山区分散供水水污染特征[J].长江流域资源与环境,2007,16(2):240-244.
- [7] 郭芳,姜光辉.西南岩溶石山地区水窖水质状况及保护措施:以云南木美地下河流域为例[J].水资源保护,2005(1):18-20.
- [8] 任坤,师阳,李晓春,等.典型岩溶槽谷区地下水化学特征及地球化学敏感性分析[J].中国岩溶,2014,33(1):15-21.
- [9] Li G B, Ma J and Du K Y. Muti-stage slow sand filtration for the treatment of high turbid water[A]//Graham N and Collins R, eds. Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration. New York: John Wiley and Sons, 1996:371-378.
- [10] 谢水波,张晓键,陈春宁,等.多级粗滤料滤床—慢滤综合净水工艺研究[J].中国农村水利水电,2001(4):25-27.
- [11] 何江涛,段光杰,张金炳,等.污水渗滤土地处理系统中水力停留时间与出水效果的讨论[J].地球科学:中国地质大学学报,2003,27(2):203-208.
- [12] 李正显,何腾兵,杨小毛,等.人工快速渗滤系统的研究与应用[J].中国给水排水,2004,20(10):30-32.
- [13] 张敏,李璐.CRI工艺在河流水质净化中的应用[J].民营科技,2008,14(9):151.
- [14] 吕锡武,马春,陈俊.粗滤慢滤组合型乡村净水工艺研究[J].给水排水,1997,23(10):21-23.
- [15] ZOU Shengzhang, YU Xiaoying, CHEN Hongfeng, et al. Research on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Constructed Rapid Infiltration System[C]. ITESS'2008:558-561.
- [16] Woudneh M B, Lloyd B, Stevenson D. The behaviour of 2,4-D as it filters through slow sand filters[J]. J. Water SRT-Aqua, 1997, 46(3):144-149.
- [17] Torgas G. Using Backwashing Kinetics to Evaluate Attachment Mechanisms and Forces During Filtration[J]. Journal of the American Water Works Association, 1983, 75(5):254-259.

In-situ treatment of micro-polluted water supply in natural wells of karst areas

ZOU Sheng-zhang, ZHU Dan-ni, LI Lu-juan, LU Hai-ping, ZHOU Chang-song

(Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR&GZAR / Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Rehabilitation, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract In the regions of Southwest China, natural karstic wells are the main sources for local water supplies in a distributed manner. In this paper, a study on the technical principle of water treatment for some representative karst wells in the karst areas was conducted, based on the analysis of the well water pollution characteristics. The objective of this study is to provide treatment measures for preventing the water from pollutions by any means. In combination of the technical principle with a pilot test, this paper presents in detail the idea for the design and associated design parameters, the technics of water treatment and the matters need attentions during the construction of rapid infiltration tank. Moreover, results of the test showed that, after the treatment of the contaminated well water, its turbidity was less than 5 degrees; the removal rate of trace organic matters reached more than 35%; the ammonia, nitrite and nitrate levels were reduced by more than 60%; and the maximum rate of bacteria removal reached 95% as well. The rapid infiltration technology applied in the water treatment does not require additional chemical agent, thus avoiding any possible adverse effect and hygienic problem arose from the use of coagulant and sterilant. The water quality of the treated natural karstic wells was hence improved, which generally meets the requirements of the national drinking water standards.

Key words subterranean stream, karstic natural well, distributed water supply, rapid infiltration, slow filtration, in-situ treatment

(编辑 吴华英)