

# 岩溶工程性缺水地区农村饮用储存水净化方法

朱生亮,张建利,吴克华,李安定,车家骧

(贵州科学院 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

**摘要:**我国西南地区降雨丰富,由于分布广泛的岩溶地貌却存在着严重的工程性缺水问题,大量居民饮水得不到保障。为了适应偏远山区分散供水缓解工程性缺水问题的需要,结合水资源利用实际情况,设计了利用简单、耗费小的水质净化简易设施,采用了物理净化处理和消毒的方法减少储蓄水中的有机质。实验结果表明:储蓄水净化微生物大幅度减少,水中有机质含量明显降低,微生物指标达到生活饮用水卫生安全标准。水质净化设施运行成本较低,具有较好的推广应用前景。

**关键词:**工程性缺水;饮水安全;水质净化

**中图分类号:**TV213.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-5485(2013)11-0016-04

我国西南岩溶区是世界三大连片岩溶发育区之一,裸露岩溶区面积约为 $5.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>,主要分布在以贵州为核心的云贵高原地区,包括黔、桂、滇、川、渝及湘部分区域。气候温湿、降雨丰沛,受强烈的水动力条件以及早期的地质构造运动影响,形成了岩溶区复杂的地质地貌,地形延绵起伏,地势陡峭,地域景观垂直差异明显<sup>[2]</sup>。由于特殊的地质环境条件,致使地表持水蓄水能力差,雨水滞留时间较短,易渗入地下水系统中而流失,同时地下水开发利用难度大,岩溶区居民用水困难,显现为工程性缺水问题。

由于特殊的地理环境,岩溶山区储水的利用越来越多,饮用水在储存过程中,受环境因素的影响,水质发生较大的变化,其结果往往是对使用者造成负面影响。为缓解岩溶山区工程性缺水问题,在保障水量供应方面修建了大量小型蓄水设施,而滞留了水质保护问题的解决。

## 1 水质净化实验区的背景

实验区位于贵州省平塘县克度镇刘家湾村,离我国最大天文射电望远镜站点大窝凼约2.5 km,处于大小井地下暗河的核心地段。地处平塘西部连片分布约200 km<sup>2</sup>的峰丛洼地群之内,这里主要以峰丛与岩溶漏斗、落水洞、天坑正负地形组合,巨型锥

状洼地密集分布,平均1 km<sup>2</sup>有3~4个洼地,直径为300~600 m,呈圆形或长条形,底部常有落水洞、天坑发育,与山顶高差为200~400 m,并伴有规律性的沿某一裂隙或地层走向呈串珠状组合或延伸分布,基本上无蓄水层带。

由于岩溶脆弱的生态环境,地下岩溶裂隙较为发育,土壤植被蓄水能力差,从而地表水资源流失快,峰丛洼地区基本上无地表水系,地表水资源匮乏,地下水受地质构造以及岩溶作用的影响埋藏较深,且汇集流通管道复杂,定位开发利用难度大。加之地质条件复杂,水利工程造价及供水成本高,工程受益区分散,并缺乏经济条件来建造、支撑取水工程而形成了区域性工程性缺水。该峰丛洼地区就是典型工程性缺水地区,分散供水现状及问题如下。

### 1.1 居住分散,难以集中供水

工程性缺水地区居民点相对分散,峰丛洼地单个溶蚀洼地居户在20户以下,居民点之间被峰丛隔离,交通不便。在此条件下,利用集中拦蓄和集中供水开发利用水资源模式难以实现,而且区域没有经济条件提供足够资金修建大量的大中型储水工程和高额的供水工程,在此大中型水利工程很难发挥作用,因而滞缓了水利设施的建设。

### 1.2 就近取水,用水前无处理

岩溶区居民利用村寨附近出露部分的裂隙水,通过联通管道在重力作用下,将裂隙泉水直接引入

收稿日期:2013-06-20;修回日期:2013-07-02

基金项目:贵州省社会发展科技攻关项目(黔科合SY[2011]3075);贵州省重大专项项目(黔科合重大专项[2012]6015号);贵州科学院青年基金项目(黔科院J合字[2012]05号);贵州省科技基础条件平台课题(黔科合院所创能[2010]4001)

作者简介:朱生亮(1984-),男,河南信阳人,助理研究员,主要从事水资源与水环境,(电话)0851-6824329(电子信箱)shengliang8419@163.com。

通讯作者:车家骧(1963-),男,贵州贵阳人,高级工程师,现主要从事环境工程研究,(电话)13908513915(电子信箱)che79@163.com。

家中。这样只需要引水管道等简单的设施,利用方便、费用少,技术简单。用软塑胶管直接引水的方法,很大程度上解决了农村人畜饮水和生产用水困难的问题,但取水水质受环境影响较大,很难得到清洁的饮水。

### 1.3 储存利用水质待改善

岩溶山区居民用水主要是裂隙水和地表集水,两者自然供水量受季节变化影响分布不均,丰水期水量较多而枯水期水量较少甚至干涸。为此修建了一些微型储水工程(小水窖、水池、水柜等)蓄水协调利用。但这类储水设施一般建造成本低,构筑简单,且储蓄时间较长、更新慢,水质容易恶化。

在峰丛洼地区平塘县刘家湾选择了 4 个水样点,于 2012 年 6 月 26 日按水样监测实验要求进行采样,并于 4 h 内送往实验室化验分析,分析水质指标见表 1,参照标准为生活饮用水卫生标准 GB5749—2006<sup>[3]</sup>。

检测结果显示:水质略微偏碱,pH 值在 8 左右,这是由于碳酸盐岩区偏碱性环境所致。检测水质指标大多数小于标准限值,感官性状和一般化学指标及毒理学指标基本上都符合标准要求,而微生物指标全

部超标,尤其是屋面集水严重超标。屋面集水可以作为生活用水,一般不建议作为饮用水使用。

## 2 水质净化工艺的设计

研究表明:引起饮用水微生物污染的主要原因是饮用水中存在有机营养物质<sup>[4]</sup>。在净化过程中,可以通过过滤、吸附等方法减少储存水中有机物质,消减水中微生物的生存空间,并截留部分水中微生物,接着进行杀毒,消灭水中病原菌等有害微生物。实验蓄水净化处理流程:预存→过滤→吸附→消毒→存储(见图 1)。蓄水分别通过物理过滤、截留和分子吸附及消毒等处理装置,利用地势产生的重力作用通过各装置间的导水管,进行分步净化处理。

### 2.1 处理装置的结构

为了便于填料的冲洗、更换,净化装置设计为分离式的,装置间有导管相连,装置中水流自下而上。实验装置的填料如下:过滤池下层为河砂,装填厚度为 20 cm,上层为珍珠岩(也可采用石英砂),装填厚度为 20 cm;截留池为陶瓷环,装填厚度为 40 cm;吸附池为活性炭,装填厚度为 40 cm,上述各实验装置

表 1 刘家湾储存水主要水质指标

Table 1 Major indexes of storage water quality in Liujiawan

指标名称	屋顶集水	蓄水池内裂隙水	蓄水池溢流裂隙水	洞穴内裂隙水	标准
总大肠杆菌/(MPN·100 mL <sup>-1</sup> )	>1 600	>1 600	1 600	23	不得检出
菌落总数/(CFU·mL <sup>-1</sup> )	36 000	5 000	3 000	720	100
砷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.001	0.001	<0.001	<0.001	≤0.01
镉/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	≤0.005
铬(VI)/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	≤0.05
铅/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≤0.01
汞/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.000 05	<0.000 05	<0.000 05	<0.000 05	≤0.001
硒/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≤0.01
氰化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	≤0.05
氟化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.21	0.19	0.15	0.12	≤1.0
硝酸盐(以 N 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.35	0.75	0.12	4.80	≤10
三氯甲烷/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	≤0.06
四氯甲烷/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≤0.002
色度	<1	0.94	<1	<1	≤15
浊度	0.22	<1	0.34	0.16	≤1
臭和味	无	无	无	无	无臭、异味
肉眼可见物	无异物	无异物	无异物	无异物	无
pH	7.85	7.81	8.17	8.11	6.5~8.5
铝/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.06	0.05	0.01	0.02	≤0.2
铁/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.012	0.050	0.004	0.008	≤0.3
锰/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	≤0.1
铜/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≤1.0
锌/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≤1.0
氯化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.15	1.94	0.77	0.82	≤250
硫酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	20.30	24.11	18.15	13.84	≤250
溶解性总固体/(mg·L <sup>-1</sup> )	246.4	339.6	285.5	304.2	≤1 000
总硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	123.75	214.02	185.62	179.53	≤450
耗氧量/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	≤3
挥发性酚/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	≤0.002
亚硝酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.002	<0.002	0.028	0.009	≤1
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	≤0.5

注:水样化验由贵州省地质矿产中心实验室、国土资源部贵阳矿产资源监督检查中心完成。

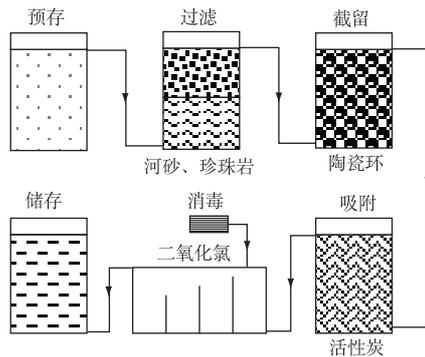


图1 净水工艺流程图

Fig. 1 Process flow of water purification

内径为 25 cm。蓄水净化速率受各净化装置过水速率限制,可以通过预存水池调节水阀控制净化水流速度,为获得较好的净水效果,需要慢速净化,较低的水力负荷有助于水中杂质的附着去除<sup>[5]</sup>。通过实验测定本装置净化处理储蓄水的采用的最大滤速为 $15.36 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

过滤池采用珍珠岩和河砂阻隔、吸附水中悬浮物质,包含有机质和微生物,消减出水杂质。经过试验并参照相关净化水质过滤研究,发现净化效果受滤料粒径、厚度影响较大。粒径大小关联着填料的孔隙度,影响着过水速率,并同填料厚度共同影响水流滞留时间。在一定的范围内采用更小粒径的滤料,短期内可以提高净化效果,但粒径过小,不仅降低了净化速率,而且限制滤料的截污能力。同样填料厚度也不宜过高,为降低成本,定期进行淘洗、更新就可以获得较好的净化效果。过滤池填料:河砂、珍珠岩,粒径确定为 0.5 ~ 5 mm。

截留池利用粒径 10 mm 的陶瓷环中空粗糙的表面截留藻类等微生物。在水质净化过滤中,滤料表面的粗糙度作用很大,滤料的表面越粗糙,滤层的截污能力也越大,过滤效率越高。利用瓷环就是使水中的杂质在瓷环表层不断地被截留,并在表面逐渐形成一层附着层,该层不仅截留消减水中悬浮物、胶体杂质,还可以附着水中藻类、细菌等微生物,去除有机物质。

吸附池运用活性炭的多孔性,具有高度发达的孔隙构造,吸附一些可溶性的胶体和大分子有机物。

## 2.2 消毒剂的选择与使用

净化试验结果表明:通过净水装置过滤、吸附之后,水体中的菌落等微生物的数量有大幅度的减少,但不能满足生活饮用水卫生安全的要求。而且净化处理后饮水的继续储存还要求对水中的微生物进行处理。参考对比现行饮用水杀毒工艺,认为处理岩溶蓄水二氧化氯是最合适的消毒剂<sup>[6]</sup>。二氧化氯安全、无毒,净化饮用水十分有效,且具有除

臭与脱色能力、低浓度下高效杀菌和杀病毒能力。

资料显示:二氧化氯杀菌速度快,不受水硬度和盐份多少的影响,能维持长时间的杀菌作用,能高效率地消灭原生动植物、孢子、霉菌、水藻和生物膜,不生成氯代酚和三卤甲烷,能将许多有机化合物氧化,从而降低水的毒性和诱变性质<sup>[7]</sup>。这些都是二氧化氯作为岩溶山区饮用水消毒剂所具有的优势。

消毒剂使用时为配置浓度为 4 750 ~ 5 000 mg/L 的二氧化氯溶液,经过稀释,按与待净化水流量形成一定的比例,通过装置匀速滴加在消毒池混合,混合水中消毒液含量为 0.4 mg/L。消毒池设计为槽型沟,通过水流在此可以自然搅拌,充分混合。

## 2.3 净化费用与效果

经过反复试验检验,经核算最终确定的实验装置(含填料)的费用在 450 元以下,设计使用 3 a。水质净化装置淘洗频率确定为 2 月一次,活性炭更新频率 6 月一次(单次更新费用 100 元左右)。水质净化实验装置日处理量为 1.5 t,年处理量为 545 t(除每次更新用时 8 h),经折算储存饮用水处理费用为 1.05 元/t,其中水消毒费用为 0.6 元/t。

对比检验过滤效果见表 2。

表2 净水过滤微生物检测表

Table 2 Detected microorganisms before and after the purification

微生物名称	过滤前/(cell · L <sup>-1</sup> )	过滤后/(cell · L <sup>-1</sup> )
蓝藻	6 993	0
绿藻	28 969	295
硅藻	13 986	225
甲藻	2 997	10
裸藻	1 998	0

注:水样化验由贵州师范大学分析测试中心完成。

实验使用 0.4 mg/L 二氧化氯对微生物指标超标的蓄存水水样进行消毒,大肠杆菌全部被杀灭,菌落总数小于 4 CFU/mL,净化处理后蓄水经 7 d 后再次监测,未发现微生物指标超出饮用水卫生安全标准。

## 3 水质净化利用的推广

我国西南地区岩溶广泛分布,特别是处于中心地带的贵州省,岩溶石山区面积为 12.96 万 km<sup>2</sup>,占全省总面积的 73.1%,是我国农村贫困面积最大、贫困人口最多的省份之一,同时也是工程性缺水问题最为突出的省份。2011 年贵州省农村人口 2 256.24 万人,占总人口的 65%,其中农村贫困人口为 1 149 万人,农村人均纯收入 4 145 元,仅为全国平均水平的 59.4%。农村供水方式落后,农村居民饮用高氟水、高砷水、苦咸水、污染水,局部地区饮用

水严重不足等问题十分突出。2005 年,贵州省开展农村饮水安全人口的现状调查评估,结果显示:全省农村饮水不安全人口共有 1 658.56 万人,占农村人口的 51.4%。其中:饮水水质不达标 537.11 万人(包括:氟、砷超标和苦咸水的共 92.11 万人,受污染水及其它水质影响的农村人口 445.0 万人),占不安全人口的 32.4%。

为解决农村饮水安全问题,国家及地方政府加大了农村饮水安全的投入,并出台了一系列的政策措施。一方面推广乡镇供水覆盖周边农村的供水模式,并发展长距离集中式输水工程。期间全省修建长距离集中式输水工程 1 025 处。另一方面加强地下水的勘探,钻井开采利用地下水。同时也加强了农村安全饮水工程维护管理。2006—2009 年,共投入修建了 6 391 处农村饮水安全工程,集中解决了 695 万人的饮水安全问题。然而大部分偏远山区受条件限制,需要分散供水的没有得到投入和重视。

由于地处偏远的工程性缺水地区不能实施集中供水,要解决饮水安全问题,并且利用分散的供水模式适应山区居民的需要,就需要灵活有实效的水质净化改善方式。对蓄水净化的措施要求:一方面要成本低,易运行维护;另一方面要有良好的净化效果,而且要保持稳定的净化性能。前期项目检验结果表明裂隙水微生物指标受季节变化影响不大(见表 3),由此可知蓄水净化作用结果相对稳定。

表 3 裂隙水微生物指标

Table 3 Indexes of microorganisms in fracture water

检验日期	细菌总数/ (CFU · mL <sup>-1</sup> )	总大肠杆菌/ (MPN · 100mL <sup>-1</sup> )	类大肠杆菌/ (MPN · 100mL <sup>-1</sup> )
2005 年 11 月 21 日	44	120	34
次年 2 月 21 日	30	153	51
次年 6 月 20 日	40	134	41
次年 10 月 20 日	36	113	32

作为偏远山区居民的主要饮用水源之一,裂隙水本身是一种比较清洁的水源,但在储存过程中受微生物孳生影响,水质恶化。利用水质净化措施,一方面过滤减少微生物的营养源—有机质,另一方面,消毒剂二氧化氯可以快速杀灭微生物,并在储存过程中抑制微生物的生长。蓄水净化措施的这些特点都有利于该方法在岩溶山区推广应用。

为进一步减轻山区居民对净水利用的经济负担,建议地方政府推进分散式饮水净化处理试点建设,加强对山区农村饮水安全的关注和资金投入,资助居住分散的偏远山区居民,引导居民处理不安全饮用水水质,使饮水安全水质方面得到保障。饮水安全问题的解决,可以使山区居民与水有关的疾病发病率大幅度降低,同时还能缓解了农业用水的压力,促进养殖业

的发展,进而提高农副产品的产量和品质。

## 4 结 语

根据岩溶山区的水资源转化规律和实地条件,结合分散型的小、微型水利工程,利用区域有限的水资源加以净化处理,使用方便且费用低的水质净化设施,是缓解饮水安全问题的重要措施。本套净水装置运行操作简单,可以反复使用,成本低,容易构建,并且可以有效地改善水体的感官性状和一般化学指标,另外还设计了消毒杀菌装置,可以一户或几户共同使用,容易推广应用,适合工程性缺水地区分散的居民点使用的需要。

### 参考文献:

- [1] 邹胜章,朱明秋,唐建生,等.西南岩溶区水资源安全与对策[J].地质学报,2006,80(10):1637-1642. (ZOU Sheng-zhang, ZHU Ming-qiu, TANG Jian-sheng, et al. Water Resources Security in Karst Area of Southwest China: Problems and Countermeasures [J]. Acta Geologica Sinica, 2006,80(10):1637-1642. (in Chinese))
- [2] 朱文孝,李坡,贺卫,等.贵州喀斯特山区工程性缺水解决的出路的关键科技问题[J].贵州科学,2006,24(1):1-7. (ZHU Wen-xiao, LI Po, HE Wei, et al. Solutions and Major Scientific Problem on Engineering Water Shortage in Karst Mountain Area of Guizhou [J]. Guizhou Science, 2006,24(1):1-7. (in Chinese))
- [3] GB5749—2006,生活饮用水卫生标准[S]. (GB5749—2006, Standard for Drinking Water Quality [S]. (in Chinese))
- [4] 张燕.喀斯特峰丛山区饮用水开发及其水质保护——以普定喇叭岩地区为例[D].贵阳:贵州大学,2006. (ZHANG Yan. Exploitation and Protection of Drinking Water for People and Live-stock in Karst Areas; Case Study of Nabayan, Puding County [D]. Guiyang: Guizhou University, 2006. (in Chinese))
- [5] 王永胜,李培红,姜玉刚,等.农村地窖水处理方法[J].水处理技术,1999,25(4):223-225. (WANG Yong-sheng, LI Pei-hong, JIANG Yu-gang, et al. The Treatment of Cistern Water in Countryside [J]. Technology of Water Treatment, 1999,25(4):223-225. (in Chinese))
- [6] 孙治荣,王宝贞.饮用水处理中的几种消毒剂[J].环境保护科学,1999,25(1):10-12. (SUN Zhi-rong, WANG Bao-zhen. Some Disinfectants Used in Drinking-water Treatment [J]. Environmental Protection Science, 1999,25(1):10-12. (in Chinese))
- [7] 代园园,员建,苑宏英,等.二氧化氯作为消毒剂在饮用水处理中的应用[J].净水技术,2011,30(1):4-7. (DAI Yuan-yuan, YUAN Jian, YUAN Hong-ying, et al. Application of Chlorine Dioxide Disinfectant in Drinking Water Treatment [J]. Water Purification Technology, 2011, 30(1): 4-7. (in Chinese))