

文章编号: 1001-4810(2009)04-0370-05

西南地区岩溶水源地类型及开发技术条件^①

王宇

(云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216)

摘要:明确了岩溶水源地的定义,并提出了新的岩溶水源地分类方案。首先按岩溶含水层的埋藏分布、岩溶水出露状态,将岩溶水源地划分为天然出露的岩溶水源地及隐伏的岩溶水源地两大类。然后再根据岩溶水源地的岩溶含水介质特征(导水和赋水空间形态、结构及水动力特征)进一步将天然出露的岩溶水源地划分为暗河、泉、表层泉三个亚类,将隐伏的岩溶水源地划分为饱水带富水块段、表层带富水块段两个亚类。并研究评价了各个类型的岩溶水富集规律、动态特征、岩溶水资源、开发技术条件。

关键词:岩溶水源地;分类方案;岩溶水资源;开发技术条件;西南岩溶区

中图分类号:P641.8 **文献标识码:**A

0 前言

在西南岩溶石山地区,由于强烈的构造运动,断裂交错发育,各个时代的地层被切割成不同形态的断块,错落分布于不同的高程上,加之岩溶含水层与非岩溶相对隔水层在垂向上的间隔状分布,以及地形地貌的影响,从而形成了诸多相对独立的水文地质单元^[1]。在此所说的岩溶水文地质单元(karst hydrogeologic unit)是指:一个独立的岩溶水补给、径流、排泄系统,具有完整的边界和内部统一的水力联系。多以地下分水岭、弱透水的岩土体、断层以及河流构成其隔水或透水边界。在地下水系统科学研究中,通常也称之为岩溶水系统(karst water system)。

由于岩溶发育的不均匀性和岩溶水赋存条件的变化所决定,在目前经济技术条件下,在各个岩溶水文地质单元的空间分布范围内,并不是任何地段都适宜于建设岩溶水开发工程。但在地貌、地层、构造等地质因素的控制作用下,在岩溶水文地质单元中往往都会形成一些适宜工程取水的水源地,这是我们进行岩溶水允许开采量勘查评价,研究岩溶水开发利用的重点。因此,岩溶水源地(karst water source field)是指

在一个浅循环岩溶水文地质单元(或岩溶水系统^[2])内,岩溶水资源富集,水质和水量能够满足一般生产和生活供水要求,补给保证程度可达到所要求的保证率,开采经济技术及地质环境条件、防污性能优良,适宜取水工程建设的岩溶水天然出露点或隐伏富水块段。

水文地质单元有着明确的水文地质边界,纯属自然单元,不因人的意志而改变。而地下水源地则主要是由目前的经济技术条件所决定的,人为圈定的适宜工程开发的地段或位置点。各个水文地质单元之间是没有水力联系的,只有在地下水的排泄点(带)下游才可能发生水力联系。而在同一个单元之内的各个地下水源地之间是没有隔水边界的,当某一个水源地的开发超过一定的强度时,就必然影响到其它水源地。如:位于盆地底部平坝区的饱水带富水块段中钻井大降深抽取地下水,就必然会削减盆地边缘岩土分界线附近出露的泉或暗河流量。

1 岩溶水源地分类方案

地下水源地的分类是供水水文地质工作中最重要和最有实际意义的问题之一,它不仅对勘探试验和

① 基金项目:973计划前期研究课题“云南岩溶高原水源涵养功能恢复机制观测研究”(2009CB426312)

作者简介:王宇(1960—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水文、工程、环境地质调查研究。E-mail:ynddywy@163.com。

收稿日期:2009-07-02

观测工作能起到直接的指导作用,而且也是地下水资源评价的理论基础。对于岩溶水源地,岩溶水的埋藏与分布、出露状态、含水介质特征等地质因素不同,则岩溶水勘查评价及开发技术、工程措施和方案都不尽相同,且允许开采量的组成也不完全相同。因而以正确的符合实际的分类作为基础,勘探和评价工作才能有的放矢,减少盲目性,提高工作效率,并且通过实践不断促进勘探手段和评价理论的发展。随着国内外地下水的开发和利用,许多水文地质专家和学者都注意到了水源地的分类问题,特别是20世纪70年代以来,各种分类方案应运而生。但由于岩溶水文地质及开发技术条件复杂,对开发实践的研究也较为薄弱。因此,岩溶水源地的分类目前主要停留于按某一水文地质因素的差异进行分类,最普遍的就是根据岩溶含水层的埋藏状态进行划分。至今,大多数规范和规程仍沿袭着裸露型、覆盖型、埋藏型的三分方案^[3],这一分类方案主要考虑了可溶岩层的埋藏情况,以及由此引起的含水介质特征的差异。对于认识岩溶含水层的埋藏分布与赋水的均匀性意义明确,对小比例尺的区域水文地质普查,达到基本查明地下水分布情况的目的,曾起到了重要的指导作用。但从岩溶水的开发实践需要来评价,显然对岩溶水资源的形成、运动过程和相互联系及水源地的开发技术条件考虑不够系统和全面。为了确切地反映岩溶水文地质单元内岩溶水源地的开发技术条件,给岩溶水资源勘查评价和开发正确地选择技术手段和方案提供理论指导,促进因地制宜地开发利用岩溶水,需要进一步深入研究和发

展,提出能够更具体的新方案。

岩溶水的开发技术条件(exploitive technical condition of karst water),是指对岩溶水的勘查和开发工程技术方案选择及设计有影响的各种地质因素。主要包括:地形地貌、含水层的埋藏分布、地下水出露状态、导水和赋水空间形态、结构及水动力特征、岩土工程地质特性等。岩溶含水层被松散土层覆盖或非可溶岩埋藏的水源地,必须通过地球物理探测和钻探才能确定岩溶水资源的特征。而在这种条件下,含水层岩溶发育比较均匀,地形起伏和缓,物探发射和接收装置的接地条件好,物探技术的适用性较好,探测的准确性和钻孔成井率较高。并且也只有通过开凿工程,才能够开采岩溶水,发挥丰富的储存资源的调节作用;岩溶水的天然露头——暗河、泉,其流域多为岩溶石山区,地层、构造裸露,地形起伏大,岩溶发育不均,导水和赋水空间形态以溶洞管道为主,溶隙散流层不发育,物探和钻探的适用性差,但地面测绘和水文观测的条件和效果好,同时可直接采用引、提、堵、蓄等技术方案开发岩溶水;而表层岩溶含水层分布的连续性差,流域面积往往局限于汇水地形,含水层岩溶发育不均,但埋深浅^[4],即使是隐伏的表层岩溶水,也容易通过地面测绘分析和轻便的物探方法来认识,并利用轻型钻探揭露和浅井开发岩溶水。因此,从岩溶水的勘查评价和开发的需要出发,岩溶水源地分类方案必须明确反映岩溶水的开发技术条件。为此,本文按岩溶含水层的埋藏分布、岩溶水出露状态,将岩溶水源地划分为天然出露的岩溶水源地及隐伏的岩溶水源地两类(表1)。再根据岩溶水源地的岩溶含水

表1 岩溶水源地分类方案
Tab.1 Classification of karst water source field

类型	亚类	水文地质基本标志及属性				
		埋藏分布	导水和赋水空间形态及结构	富水的均匀性	水动力特征	径流动态类型
天然出露的岩溶水源地	暗河	地下径流洞管深埋藏,通过集中排泄口、天窗、落水洞、溶井等出露地表	溶蚀洞穴、管道、湖潭和溶蚀裂隙系统,呈树形结构	极不均匀	快速、急变的溶洞管道流	峰态型为主
	泉	地下径流管埋藏深浅不一,通过集中或分散的排泄口出露地表	溶蚀管道、溶蚀裂隙系统,呈树枝形或脉状结构	不均匀或较均匀	较快速、急变的管道流或慢速、缓变的溶隙扩散流	峰态型或波态型为主
	表层泉	地下径流溶隙浅埋藏,通过集中或分散的排泄口出露地表	溶隙和溶孔,呈树枝状结构	不均匀或较均匀	较快速、急变或缓变的溶隙扩散流	峰态型为主
隐伏的岩溶水源地	饱水带富水块段	岩溶含水层上覆一定厚度的表层岩溶带、包气带或有弱透水盖层	溶蚀裂隙系统,呈网状结构	较均匀或均匀	慢速、缓变的溶隙扩散流,多具二维流特征	波态型或稳态型为主
	表层带富水块段	岩溶含水层上覆一定厚度的包气带或有弱透水盖层	溶隙和溶孔,呈树枝状或网状结构	不均匀或较均匀	慢速、缓变的溶隙扩散流	峰态型或波态型为主

介质特征——导水和赋水空间形态、结构及水动力特征,进一步将天然出露的岩溶水源地划分为暗河、泉、表层泉三个亚类;将隐伏的岩溶水源地划分为饱水带富水块段、表层带富水块段两个亚类,各类岩溶水源地的人文地质标志和属性如表1所示。

2 岩溶水源地的开发技术条件

根据丰富的岩溶水文地质调查和岩溶水开发示范成果资料^[5,6],本节将尽可能全面归纳总结出各类岩溶水源地开发技术条件的差异,阐明不同类型的岩溶水源地岩溶水勘查和开发技术的适宜性。

2.1 天然出露的岩溶水源地

天然出露的岩溶水源地是指岩溶水已经通过溶井、暗河天窗暴露出来,或者在一定的水文地质、地形地貌条件下,岩溶水通过出露于地表的径流通道出口排泄到地表而形成的水源地。人们可以直接观测到岩溶水,并使用适当的工程措施直接开发利用岩溶水。

2.1.1 暗河(subterranean stream)

指具有洞状的地下径流主干通道和集中排泄口的天然岩溶水径流系统。沿地下径流的主干洞、管延伸地带,岩溶水通过天窗、落水洞、溶井、暗河出口等出露地表。岩溶水主要通过地表串珠状发育的岩溶洼地、漏斗、落水洞等汇水地貌获得大气降水、地表水的点状灌入式补给。其赋水空间为溶蚀洞穴、管道、湖潭和溶蚀裂隙系统,呈树形结构,岩溶发育极不均匀,岩溶水径流主要为快速、急变的溶洞管道流,集中排泄,径流动态以峰态型(动态系数:最大流量与最小流量的比值 $\Delta \geq 30$)为主,含水介质的天然调节能力弱。

该类水源地往往埋藏分布于岩溶含水层裸露或半裸露、分异溶蚀突出,岩溶发育不均匀,地下岩溶洞、管发育的岩溶山地、岩溶槽谷、峰丛洼地、溶丘台地等地区。是山区人畜饮水、农业用水、生态建设用水等供水的主要水源。其水文地质特征归纳起来主要有四个方面:①岩溶赋水空间以随机分布的溶洞管道为主,洞管周围溶隙散流层不发育,岩溶分布极不均匀、埋深大,目前的技术手段尚难准确地探明其分布位置。②降水主要通过漏斗、落水洞等汇水通道形成点状补给,直接灌入补给暗河径流,部分也通过溶隙呈面状入渗补给散流层,再汇入暗河径流。由于溶洞管道流系统与外界环境交流密切,水交替迅速,动态变幅大,雨季流量往往是旱季流量的数十至数百倍,水质变化也比较复杂。③岩溶水资源主要是洞管径流

量,往往以洞状暗河出口的形式集中排泄,一般流量巨大。

由其水文地质特征所决定,适宜多方式、多源取水,以用引、提、堵、蓄的方式开发利用溶井、暗河出口等天然出露的岩溶水为主。只有在岩溶发育较为均匀,储存量较丰富的地段,才宜钻井开采岩溶水。对有条件的暗河系统,通过建设地下水库、地表—地下水库调蓄,可大大提高岩溶水的利用率。

典型实例如云南文山白石岩暗河。暗河流域面积约680 km²,出口段与地表河谷垂直相交,水位齐平,平均流速0.112~0.73 m/s,流量1.53~23.5 m³/s,流量动态呈波态型。暗河发育于向斜核部,流域内断层发育,以北东向为主,多为正断层,暗河管道与断层走向基本一致,管道上部洼地、漏斗、天窗、竖井呈串珠状分布。暗河流域内含水层主要是纯碳酸盐岩含水层组,成片出露。边界为砂页岩、砂泥岩,岩组未被断层大幅错移,连续性好,构成较为封闭的隔水边界。人们利用有利的开发技术条件,在白石岩暗河的出口段采用不清基、不围堰,高压灌浆处理坝基后进行洞内封堵,将地下水位抬高126 m,形成了兴利库容2 353万m³的中型地下水库,水库利用水量1.32亿m³,兼具发电和抗旱功能。

2.1.2 泉(karst spring)

指地下导水和赋水空间为溶蚀管道、裂隙,排泄口呈管隙特征的岩溶水天然露头。其溶蚀管道、裂隙系统,呈树枝形或脉状结构,岩溶发育不均匀或较均匀,岩溶水径流主要为较快速的急变或缓变管道、溶隙扩散流,单一出口或多个出口成泉群集中排泄,径流动态以峰态型或波态型($3 \leq \Delta < 30$)为主,含水介质的天然调节能力较弱。

该类水源地与暗河比较,除了流量一般相对较小、没有建设地下水库的技术条件以及有些泉点动态较为稳定之外,其它特征则是基本相似的。该类水源地也大多分布于裸露岩溶石山地区,也是山区生活和生产用水、生态建设用水等供水的主要水源。如广西南丹城市供水就引用了城西龙王庙泉流作为水源,该泉口高程比水厂高,最枯流量100 L/s,自1965年起就开始通过管道引水开发利用^[7]。

由其水文地质特征所决定,适宜以引、蓄的方式开发利用泉流为主。对泉口下游有条件的地区,通过修建坝塘、水库调蓄,同样可以提高岩溶水的利用率。

2.1.3 表层泉(epikarst spring)

表层岩溶水是赋存于表层岩溶带的溶隙和溶孔

中的地下水,表层泉是表层岩溶水的天然露头,其出露状态往往呈细小的股状流出或散流状渗出。

表层泉的水文地质特征主要为:①赋水空间主要为表层溶蚀裂隙、孔隙系统,呈网状或脉状结构,岩溶发育不均匀或较均匀。②表层岩溶含水层(带)一般薄且连续性较差,泉域范围小,含水介质的储存调节功能弱,加之埋深浅而与外界联系密切,径流动态以峰态为主,水质随环境状况变化较大。③表层岩溶含水层下伏存在非可溶岩、弱溶蚀的不纯碳酸盐岩悬托层,这是岩溶石山地区形成流量较稳定的表层泉的必要条件。

表层泉对饱水带深埋的岩溶山区人畜饮水具有很大的供水意义,这不是取决于其流量大小,而是由于其分布位置高且分布较广泛。若与山区小型水利工程的建设相结合,可以解决小型积蓄水工程旱季干枯、水质恶化的问题,对解决岩溶山区人畜饮水困难意义重大。主要适宜于小水窖、水池积蓄,小水沟、水管引泉开发。据不完全统计,贵州岩溶石山地区已开发利用的表层泉多达1 250余处,对解决山区农村缺水困难发挥了重要作用^[8]。

2.2 隐伏的岩溶水源地

隐伏的岩溶水源地是指岩溶水埋藏于地下,人们在地表不能直接观测到的水源地。只有通过水文地质测绘分析、地球物理探测等间接的勘查来寻找和圈定富水块段,再通过钻探试验进行验证和取得开发工程设计所需的水文地质依据,最终采用地下开凿工程来开发岩溶水。一般情况下,受目前勘查技术水平的限制,探测地下岩溶水径流洞、管的准确、可靠程度还很低,通过钻井、坑道等开凿工程开发地下溶洞管道流的风险很大。所以,这类水源地的勘查及开发主要是针对富水块段。富水块段(water-rich block)是指在有利于地下水富集的水文地质、地形地貌条件下形成的,含水层富水性较强且比较均匀的三维储水地块。

2.2.1 饱水带富水块段(saturation zone water-rich block)

指饱水带岩溶含水层埋藏于地下,上覆一定厚度的表层岩溶带、包气带或有弱透水盖层,下伏弱透水底板的三维储水地块。其岩溶含水层埋深在一般生产、生活供水的经济技术允许范围内,含水层富水性等级达到中等(单井涌水量 $\geq 200 \text{ m}^3/\text{d}$ 、平均径流模数 $\geq 1 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$)及其以上,有满足供水目标要求的补给保证程度,以及满足枯雨季调节需要的储存量,地质环境及卫生防护条件优良。含水层赋水空间主要

为溶蚀裂隙系统,呈网状结构,岩溶发育较均匀或较均匀,岩溶水径流主要为慢速的溶隙扩散流,多具二维流特征,径流动态以波态型或稳态型($\Delta < 3$)为主,含水介质的天然调节能力强。

该类水源地主要具有如下水文地质特征:①岩溶发育相对均匀、连通性好,含水层特征多等效于多孔介质,地下径流主要为慢速的扩散流。②岩溶发育深度大,有较大的储水空间和储存量,通过布井开采,起到调节枯季径流量减少的作用,水源地均为调节型。③受岩溶发育特征的控制,含水层在一定程度上也具有富水性垂向成层分带,平面上不均匀分布的特征。④含水层埋藏封闭较好,与外界无直接联系,受外界影响相对较弱。因此,岩溶水动态变幅较小,一般水质优良。

由以上水文地质特征所决定,饱水带富水块段是城镇、村庄、厂矿集中供水的主要水源地。根据其水文地质特征,主要适宜于钻井开发,对于含水层埋藏较浅的岩溶槽谷、洼地、台地区,也适宜采用汲水斜井、大口井、截水槽等方式开发。

以云南泸西岩溶盆地为例,盆地周围为岩溶山区,盆地底厚达数十至数百米的土层所覆盖,覆盖区面积 78.1 km^2 。岩溶含水层从山区至盆地由裸露转变为覆盖或埋藏型。裸露岩溶山区为岩溶水的补给径流区,盆地覆盖或埋藏型含水层在埋深 150 m 以上岩溶发育,富水性较均匀,岩溶水位埋深一般小于 20 m ,动态稳定,形成了饱水带富水块段,普遍采用钻井开采岩溶水提供生产生活用水。根据已有钻井资料,成井率大于 90% ,平均涌水量 $410.95 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.2.2 表层带富水块段(epikarst zone water-rich block)

指表层岩溶含水层埋深小于 30 m ,富水性较均匀,上覆一定厚度的包气带或同时存在弱透水浮土层,下伏弱透水底板的三维储水地块。单井涌水量至少能够满足一户普通人家的生活用水需求。

这类水源地主要分布在溶蚀槽谷、溶丘台地、峰丛洼地和盆地周边的缓坡地带,其水文地质特征主要有:①赋水空间主要为溶蚀程度高、密集发育的溶蚀裂隙网,岩溶发育不均匀或较均匀,岩溶水埋藏浅。②表层岩溶含水层一般分布局限、薄且连续性较差,含水介质的储存调节功能弱,单井涌水量小,允许开采量有限。③埋深浅而与外界联系密切,水位动态大多为峰态型,部分呈波态型,且水质易受污染。

鉴于表层带富水块段上述水文地质特征,主要适

宜浅井开采,满足分散供水需求。对岩溶石山地区分散农村生活用水和发展名特优经济作物,以及经济作物抗旱保苗用水价值很大。

泸西纳堡表层带富水块段,面积2.89 km²,表层岩溶带一般厚度2~15 m。浅部土层之下至20 m深度范围内,岩溶以溶隙、管道为主,溶管直径一般0.5~0.8 m,粘土充填一半充填,溶隙亦多有粘土充填,20 m以下岩溶发育迅速减弱,仅见少量细小的溶隙、溶孔。水位埋藏较浅,一般4~7 m,水位不统一且旱、雨季节变化较大。曾施工示范浅孔22口,17口成井,涌水量2~36 m³/d。

3 结 语

本文基于西南岩溶石山地区大量的水文地质调查及地下水开发实践获得的宝贵资料,尝试性地研究总结了岩溶水源地的分类和开发技术条件,以期对岩溶水的勘查和开发提供积极的帮助。但由于岩溶发育

的不均匀性和多变性,以及笔者水平所限,文中错漏之处难免,敬请各位同仁给予指正。

参考文献

- [1] 王宇. 云南省岩溶水开发利用条件分析评价[J]. 水利学报, 2001, (1): 49-52.
- [2] 王宇. 西南岩溶区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 114-119.
- [3] 殷昌平, 孙庭芳, 金良玉, 等. 地下水源地勘查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 19-23.
- [4] 劳文科, 蒋忠诚, 时坚, 等. 洛塔表层岩溶带水文地质特征及其水文地质结构类型[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 258-266.
- [5] 王宇主编. 岩溶找水与开发技术研究[M]. 北京: 地质出版社, 2007. 30.
- [6] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 103-107.
- [7] 袁道先主编. 岩溶地区供水水文地质工作方法[M]. 北京: 地质出版社, 1979. 10.
- [8] 王顺祥, 杨秀忠. 贵州表层岩溶带发育特征及其供水意义[A]. 中国地质调查局. 中国岩溶地下水与石漠化研究[C]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2003. 177.

Classification and exploitive technical condition of karst water source field in southwest China

WANG Yu

(Yunnan Institute of Geo-environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract: It is redefined the meaning of "karst water source field" and put forward a new category of "karst water source field" in this paper. Firstly, based on the situation of aquifer distribution and outcrop state of karst water, the new category classifies the karst water source field into two broad types: "natural outcropped karst water source field" and "buried karst water source field". Secondly, based on water-bearing medium, water conduit and storage place and structure, water dynamic feature, the "natural outcropped karst water source field" is subdivided into three subtypes: "underground river", "karst spring" and "epikarst spring". The "buried karst water source field" is subdivided into "saturation zone water-rich block" and "epikarst zone water-rich block". In addition, the law of water enrichment, the regime and exploitive technical conditions of the karst water are also studied in the paper.

Key words: karst water source field; classificatory scheme; karst water resource; exploitive technical condition; southwest karst area