

西南岩溶石山地区岩溶水资源 与石漠化治理^①

陈梦熊

(国土资源部咨询研究中心,北京 100035)

摘 要:我国西南地区岩溶石山分布甚广,山峦起伏,地形崎岖复杂。由于土地贫瘠,水源缺乏,水土流失严重,石漠化现象日益加剧,生态环境十分脆弱,当地居民以少数民族居多,经济落后,生活贫困。全地区虽属季风潮湿气候带,降水较为丰富,但大部分渗入地下,形成地下河,而地表严重缺水。近年来大力开发利用岩溶水资源,取得了不少成功经验,不仅有利于促进这一地区的经济发展,也有利于生态环境的改善。本文列举若干成功的实例,并以贵州、广西为重点,综合分析这两省(自治区)岩溶水资源的开发利用现状与今后发展前景。

关键词:岩溶水;岩溶大泉;地下河;地下水库;石漠化

1 西南岩溶石山地区基本特征

西南岩溶石山地区是当今全球最大的一片裸露岩溶区,面积约 $62 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占中国国土面积的 6.5%。地形西高东低,西部为云贵高原,东部为低山丘陵区,中部为高原向丘陵地带过渡的斜坡地带。从地貌特征和岩溶发育形态来看,大致可以把西南岩溶石山地区分为四个类型,即(1)峰林高原:分布在黔中、鄂西、滇北等地;(2)峰丛山地:主要分布在湘南、鄂西、黔东南一带,地表发育较多的岩溶洼地和峰丛谷地;(3)峰林平原:主要分布在广西中部;(4)岩溶断陷盆地。出露的碳酸盐岩时代,跨越古生代寒武纪至中生代的三叠纪。

西南岩溶石山地区属于亚热带季风潮湿气候区,多年平均降水量 $1\ 200 \sim 1\ 800 \text{ mm}$, 多集中在 4~8 月,约占全年降水量的 60%~70%。由于岩溶石漠地区渗漏性特别强,入渗系数高达 0.5~0.8,降水很快转化为地下径流,形成众多地下河。据统计,川、滇、黔、湘、鄂相邻的岩溶区,共有地下河 2 836 条,其长度达 13 919 km,总流量 $467 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,相当于黄河多年平均流量。与此相反,在高原峰林区和峰丛山区,地表河流极少,如桂西石山区,其地面完全没有地表河。据统计,全地区共有 1 700 万人口饮用水得不到保证。

西南石山地区,山峦起伏,沟壑纵横,岩石裸露,持水性差,水土流失严重,地表严重干旱缺水,自然条件恶劣,生态环境十分脆弱。因此,该地区集“老、少、边、穷”于一体,人民生活极端贫困。该地区包括全国 18 片贫困地区中的 5 片(武陵山、乌蒙山、九万大山、桂西北、黔东南)以及 664 个贫困县中的 109 个县,人均收入低于 150 元的人口还有 800 万。5 个贫困片农业人口约 5 500 万,耕地 433 万 ha,人均占有粮食仅为 150 kg 左右。据 1994 年全国扶贫开发工作会议,按照新标准核定,在全国 8 000 万尚未解决温饱的人口中,贵州、云南、广西就占 2 500 万人(贵州 1 000 万人,云南 700 万人,广西 800 万人)。这些贫困人口基本上居住在岩溶石山地区。

^① 作者简介:陈梦熊(1917—),男,中国科学院院士,国土资源部咨询研究中心顾问。

据统计(张卫等,2001),云南、贵州及广西三省(自治区)岩溶分布面积 $30 \times 10^4 \text{km}^2$ 。岩溶面积在各省(自治区)所占的面积百分数分别为云南 28.4%,贵州 73.6%,广西 41%。根据 1995~1998 年统计资料,云南全省 127 个县市中 115 个县市有岩溶分布,其中岩溶面积达 30% 以上的县市有 60 个,岩溶面积为 $94\,060 \text{km}^2$,居住着哈尼、彝、壮、苗、回、傣、藏、佤、纳西等少数民族近 500 万人。其中贫困县 31 个,岩溶面积高达 $54\,333 \text{km}^2$,经济落后,人们生活相当贫困;贵州全省 81 个县市中,岩溶分布面积大于 30% 的县(市)69 个,其中 38 个岩溶县需要政府扶持才能解决当地群众的温饱问题。广西岩溶区大面积连续分布于桂西、桂西南、桂中、桂东北,岩溶区中石山区 $5.6 \times 10^4 \text{km}^2$,岩溶谷地(平原)区 $4 \times 10^4 \text{km}^2$,其中岩溶分布面积占 30% 以上的县市 55 个,人口 1 681.30 万。广西贫困人口 81.64% 都分布于岩溶区。

西南岩溶区由于岩溶地质环境的特殊性,大气降水快速渗入地下,造成地表河流极不发育,地表严重干旱缺水,而丰富的岩溶地下水资源又未能充分而有效地开发利用,加上土少地薄,保水能力差,以及耕作粗放,因此粮食产量低。又因人口迅速增长,导致上山毁林开荒,进一步加剧了水土流失和石山的石漠化。这种广种薄收的农业经济,使生态环境产生进一步的恶性循环,而这一恶性循环链的始端是未能充分和有效开发利用岩溶水资源。因此,要使岩溶区脱贫致富,生态环境与经济发展呈良性循环,首先需要解决的问题是加快该地区岩溶水资源有效合理的开发利用。

2 西南岩溶水资源基本情况与开发利用现状

2.1 西南地区岩溶水资源概况

我国岩溶地层分布甚广,出露面积约 $206 \times 10^4 \text{km}^2$,其中尤以西南地区分布面积最大。西南地区不仅岩溶分布很广,而且岩溶地层从震旦系到三叠系除志留系以外,基本都以碳酸盐岩为主,总厚度可达 3 000~10 000m,其中尤以泥盆系、二叠系及中、下三叠系岩溶最为发育。由于气候湿热、降水丰沛,岩溶水循环交替作用强烈,溶孔、溶隙、溶洞及暗河水系十分发育。例如湘、黔、桂部分地区内就分布有暗河 2 014 条,枯季流量达 $602 \text{m}^3/\text{s}$ (表 1)。

表 1 西南部分地区暗河流量统计表

地区	面积(km^2)	暗河数量	枯水流量(m^3/s)
黔北	80 000	607	192
湘西	138 000	1054	252
桂中	150 000	353	158
总计	368 000	2014	602

据统计,全国岩溶地区水资源共为 $2\,039.67 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$,约占地下水总资源量的 23%,其中西南地区贵州、云南、广西、四川及重庆五个省(直辖市、自治区)的岩溶水,天然资源总计达 $1\,375.14 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,约占全国岩溶水资源总资源量的 66%。其中重庆、贵州、广西岩溶水资源分别占各省(直辖市、自治区)地下水资源的 81.94%、71.98%、55.09%(表 2)。西南岩溶地区虽然岩溶水资源很丰富,但开发利用程度很低。例如贵州开发利用率仅为 5.7%,广西利用率仅为 8.57%,云南约为 5%~10%。由此可见,岩溶水资源潜力很大,在西南地区具有特殊的重要地位。

表2 西南地区主要省、直辖市、自治区岩溶水天然资源量统计表

省(直辖市、自治区)	地下水资源量 ($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	岩溶水资源量 ($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	岩溶水所占比例 (%)
重庆	143.86	117.88	81.94
四川	545.98	177.57	32.54
贵州	437.71	315.07	71.98
云南	747.31	348.92	46.37
广西	754.65	415.70	55.09
总计	2 629.51	1 375.14	52.32

2.2 关于岩溶水系统分类

根据岩溶地貌、岩性和地质构造条件,以及含水层系统结构,西南岩溶系统可划分为两大类型和四个亚类(表3)。第一大类称为岩溶石山裸露型岩溶水系统,岩溶水基本分布在侵蚀基准面以上,并以泉和暗河的形式向外排泄。第一大类又可划分为两个亚类:(1)表层岩溶水系统,一般表现为局部的、分散的表层泉,汇水面积小,但数量多,不少是季节性泉。对严重缺水的广大石山地区,开发利用表层泉,对解决广大农村的人畜用水和改善人民生活水平,具有重要意义。表层岩溶泉大部分属风化裂隙带下降泉,风化带的厚度一般为2~30m,其中2~10m最为发育。(2)浅层岩溶水系统,主要由溶隙、溶洞及管道等多介质所构成的暗河系统,在石山地区一般埋藏深度50~300m不等,汇水面积较大,流量也比较大,大部分在河谷排出。暗河的发育主要受构造条件控制,暗河的流量主要决定于汇水面积与岩性。例如贵州在纯石灰岩内暗河最为发育,暗河流量约占全部暗河流量的75%。云贵高原在1 250~2 100m的高程内,大致有3~4个古夷平面,岩溶大泉或暗河的出露点大多分布在不同夷平面的分界线上。岩溶大泉或暗河是目前开发利用岩溶水的主要对象。

表3 岩溶水系统分类

类	岩溶水系统名称	
I	岩溶石山裸露型岩溶水系统	
亚类	1	表层岩溶水系统(表层岩溶泉系统)
	2	浅层岩溶水系统(岩溶大泉或暗河系统)
II	岩溶平原(包括断陷盆地)岩溶水系统	
亚类	1	覆盖型浅层岩溶水系统
	2	埋藏型深层岩溶水系统

第二大类为岩溶平原(包括断陷盆地)型岩溶水系统,并可划分为两个亚类:(1)覆盖型浅层岩溶水系统,一般在岩溶含水层之上,覆盖10~30m厚的第四系潜水含水层,两者存在密切的水力联系。岩溶含水层一般岩溶化程度高,常构成网状溶隙系统,补给条件好,富水性强,具有较高的开发价值,是城镇供水的重要供水水源。(2)埋藏型深层岩溶水系统,常分布在中新生界断陷盆地内,岩溶含水层埋藏在相对隔水的第三系或白垩系之下,其埋深一般为100~500m,地区差异很大。如果埋深大于500m时则不利于开采,而且水质可能变坏,或温度升高为热水。例如四川盆地中白垩系侏罗系之下的三叠系深部岩溶水,基本上以盐卤水为主。深埋型岩溶水由于补给条件和开采条件受到一定的限制,因此开发利用的地点相对较少。

2.3 岩溶水的开发利用方式与典型实例

岩溶地下水历来是岩溶地区重要的供水水源,近年由于城乡经济的发展及地表水体的污染,对地下水的需求量急剧增加,尤其是在碳酸盐岩分布地区,岩溶水在石山地区的开发利用日益重要。在广西、贵州、湖南、四川、云南等主要岩溶分布区,地下河及其天窗、大泉的利用程度及地表、地下水综合利用程度都日益提高。几十年来采用各种方式开发岩溶水,如城市、工矿、农业的凿井供水或直接引用地下河、大泉供水;修建各种地表、地下水利工程,建成了大量的中、小型水库和山塘;采用堵水洞、拦截、围堰等多种方式蓄积岩溶地下水;在有条件的地方建成地下水库及各种形式的引水、提水工程;利用地表河(尤其是高原区地表水河流)、地下河、大泉出口的落差,建立水电站,如猫跳河梯级开发;热、矿水资源已部分用于农田水灌、育秧、水沐浴及建疗养院;利用岩溶景观的天然风光发展旅游业,如广西漓江、贵州黄果树瀑布、四川黄龙九寨沟及重庆南、北温泉等。

中国地质调查局所编的《西南岩溶石山地区地下水与石漠化地质环境调查及示范整治可行性研究报告》,初步总结了岩溶地区开发利用岩溶水的成功经验,现对其中若干典型实例,列举如下。

(1)广西马山弄拉开发表层岩溶泉的成功实例:弄拉是位于峰丛洼地中的一个自然村,居民共 125 人,耕地 1ha,1958~1963 年,天然林被砍光,石漠化严重,生态环境日趋恶化。近年来重点对该地区的表层岩溶泉进行调查开发,并建设水柜等蓄水配套工程,可蓄水 1 000 多立方米,不仅满足全村人畜用水,还可用于灌溉。在此基础上,调整农业结构,重点发展水果、药材、水源林等名优特作物,实行封山育林,森林覆盖率恢复到 70% 以上,人均收入超过 3 000 元。岩溶石漠化基本得到控制。

(2)湘西龙山县洛塔乡建设地表、地下联合水库的成功经验:通过详细勘查,在地下河出口处用堵体堵塞洞口,建成地下水库,利用地面洼地引水建成地表水库,两者连通实行联合开发,库容达 $7\,000 \times 10^4 \text{m}^3$,解决了农田旱涝问题;同时采取封山育林等综合治理措施,1985~2000 年人均粮食产量从 85kg 增加到 400kg,人均纯收入从 40 元增加到 1 500 元,森林得到恢复。洛塔地区共有长度 1km 以上的暗河 51 条,通过调查研究与统一规划,建成燕子洞、枇杷洞、牛鼻子洞、八仙洞等四处溶洼水库及燕子洞、八仙洞、刺猬洞三处地下水库,组合成以燕子洞地下河为主体的水库群,实行梯级开发,总库容为 $75 \times 10^4 \text{m}^3$,灌溉耕地 138.3ha,装机容量为 26kW。

(3)贵州普定马官建设地下、地表联合水库的成功经验:马官地处峰丛洼地,地表严重缺水。通过详细的勘察工作,发现水洞地下河,洪峰流量可达 $3.5 \text{m}^3/\text{s}$,而枯季仅为 $0.001 \text{m}^3/\text{s}$,但该地下河具备良好的成库条件。附近相邻地区的羊皮寨地下河,流量 $89.78 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,经勘察可引入马官的冲头洼地,建成地表地下联合水库,总库容 103.13 万 m^3 。1990 年动工,当年施工当年受益,工程投资仅 71.8 万元。该联合水库建成后解决了马官镇 5 000 人、1 200 头大牲畜的饮水问题,推动了乡镇企业的发展。自流灌溉面积扩大到 334km^2 ,粮食单产由每公顷 6 000kg 增加到 9 000kg,全区增产 100 万 kg,人均纯收入由 980 元增到 1 460 元。10 年来森林覆盖率由原来的 8.41% 扩大到 30.7%,石漠化土地明显减少,洪涝灾害基本消除。

(4)贵州独山开发的成功经验:独山地区大力开发岩溶水资源,修建地表水库 11 座,库容 $658 \times 10^4 \text{m}^3$;地下水库 16 座,库容 $919.4 \times 10^4 \text{m}^3$;引水工程 75 处,灌田 608.9ha;建提灌站 709 处,利用水头落差发电,装机容量 5 746kW,灌田 1 272.86ha。如此大规模的开发岩溶水资源,在国内尚不多见。

(5)广西南宁金光农场采用机井开发地下河的成功实例:地下峰林平原,属覆盖型岩溶,补给条件好,形成暗河排入右江。原来提取江水灌溉,因费用过高,连年亏损。经过详细勘察,改采用井灌工程方案,完成机井 24 眼、大口井 4 眼,实行井群联合运行,总开采量 $15 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,平均单井出水量 $1\,600 \text{m}^3/\text{d}$,最大单井出水量 $3\,400 \text{m}^3/\text{d}$,成本低,管理方便,灌溉耕地 $1\,800 \text{ha}$,建立了统一的灌溉系统,并解决了 6 000 人的饮水问题,扭转了亏损局面,1982 年盈利 300 万元。

(6)云南蒙自五里冲利用盲谷建立水库的成功经验:利用天然岩溶盲谷堵洞,采用帷幕高压灌浆进行防渗处理,建成无坝中型水库,库容 7 984 万 m^3 ,1997 年已开始向蒙自供水,年供水量 $8\,161 \times 10^4 \text{m}^3$,增加灌溉面积 6 667ha,水利化程度提高到 70% 以上,工业用水 $1\,210 \times 10^4 \text{m}^3$,促进了工业发展,成为振兴蒙自经济的一项重大工程。

3 贵州省岩溶水资源及其开发利用

3.1 岩溶水资源概略统计

贵州是一个以岩溶地形为主的高原山地省份,岩溶区拥有全省 3/4 的人口,省会贵阳市及 70 多个地、州、县级城市,以及绝大多数工矿企业都分布在岩溶区,因此贵州地下水的开发利用基本上都集中在岩溶区。根据贵州省地矿厅资料,贵州全省多年平均地下水天然资源量为 $479.39 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,其中岩溶地下水天然资源量为 $386.26 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,占全省地下水资源总量的 80.5%(表 4)。

表 4 贵州省岩溶水资源统计表

(单位: $\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)

全省地下水天然资源量	岩溶水天然资源量	岩溶水所占比例(%)	岩溶水可采资源量	岩溶水开采量	开采所占比例(%)
479.39	386.26	80.5	131.26	22.22	5.7

注:1. 以上数据主要参考《贵州省水文地质志》,其中地下水及岩溶水天然资源量与表 2 中的数据有出入。

2. 可采资源量主要按 $>5\text{L/s}$ 的大泉或地下河统计,其中包括 $8.38 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 非岩溶地下水。

3. 统计的开采量可能比实际偏小。

全省出露的碳酸盐岩中,石灰岩分布最广,岩溶也最发育。岩溶管道系统复杂,规模巨大,常形成特大岩溶泉和地下河系。据统计(贵州省水文地质志,1996),以石灰岩为主的地层共出露常年性大泉 1 109 个(表 5),占全区岩溶大泉的 64.85%,年均枯季流量 $91.80 \text{m}^3/\text{s}$;地下河 806 条,占全省地下河的 71.38%,总长 4 562km,年均枯季流量 $169.14 \text{m}^3/\text{s}$ 。两者枯季流量总计 $260.94 \text{m}^3/\text{s}$ 。在白云岩分布地区,据统计有大泉 319 处,枯季流量 $23.84 \text{m}^3/\text{s}$;地下河 155 条,枯季流量 $26.62 \text{m}^3/\text{s}$ 。总计两者枯季流量共为 $50.46 \text{m}^3/\text{s}$ 。由此可见白云岩地区岩溶水仅占石灰岩地区的 1/5。

表5 贵州省岩溶大泉及地下河流量统计表

水点类型	岩组	数量(个/条)	偶测流量(m ³ /s)	枯季流量(m ³ /s)
岩溶大泉	石灰岩	1 109	272.76	91.80
	白云岩	319	57.06	23.84
	碳夹碎	168	38.08	14.43
	碎夹碳	113	16.50	7.43
	小计	1 709	384.40	137.50
地下河	石灰岩	806	478.40	169.14
	白云岩	155	110.50	26.62
	碳夹碎	118	55.88	20.56
	碎夹碳	51	33.95	9.92
	小计	1 130	678.73	226.24
总计	2 839	1 063.13	363.74	

注:表中“碳夹碎”为碳酸盐岩夹碎屑岩,“碎夹碳”为碎屑岩夹碳酸盐岩。

从表5中可明显看出,不论大泉或暗河,其个数或流量均与岩性密切相关;不论哪种岩层,其偶测流量与枯季流量均相差悬殊,一般相差可达23倍。因此过去按枯季流量评价可采资源量,显然偏于保守。

3.2 岩溶水资源的开发利用

据贵州全省16个比较重要的市、地、州的统计,地下水年均总流量达 $286 \times 10^8 \text{m}^3$,而利用的水量仅 $38.06 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,占总流量13.31%(表6),其中包括发电用水 $18.41 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,因此实际利用的岩溶水仅 $20 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 左右,可见潜力很大。

表6 贵州省16个地、市、区岩溶水天然露头开采量统计表

调查水点数	年均流量($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	利用水点数(个)	已利用流量($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	利用率(%)
24 741	286.00	2 780	38.06	13.31

据对省内66个县(市)的不完全统计(表7),截至1989年底地下水开采量为 $7.617 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ (表7)(综合各县市已有取水登记资料,显然该数字偏小,大体反映城镇用水量状况,而未包括农村人畜饮用水)。在 $7.617 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的开采量中,其中引泉(含提取浅层岩溶水露头) $5.696 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,井采 $1.921 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ (全省822口生产井统计)。全省地下水开采量占开采资源量的5.80%,是枯季资源量的3.71%,是年平均天然资源的1.59%。地下水开发程度的特点是以工农业较为发达的安顺地区、遵义地区最高,其开采量占开采资源的12.26%及12.09%;以工农业较不发达、地下水开采条件较差的黔东南州、毕节地区及铜仁地区地下水利用率最低,仅1.21%~1.89%。其余的黔西南州及黔南州居中,地下水利用率分别为4.04%和4.40%。

表7 贵州省66个县、市岩溶水开采量统计表

	开采方式		消耗量($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)		
	引泉($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	井采($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	农灌	生活用水	工业用水
开采量($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	5.696	1.921	4.687	1.618	1.312
所占百分比(%)	75	25	61.54	21.24	17.22

省内由于工农业发展程度和地下水开采条件的不同,各县之间地下水开采量和资源利用率差别也很大。大致可分为三种情况:①工农业都较发达,地下水开采量大、利用率高的县,如

遵义县、绥阳县地下水开采量分别为 $0.837 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 及 $0.666 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 地下水开采资源的利用率达 20.77% 和 19.04%。②岩溶水资源特别丰富, 开采条件特别优越的县, 如普定县、独山县地下水开采量分别高达 $0.73 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 与 $0.571 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 开采资源利用率高达 60.68% 及 42.45%。③工农业不甚发达的一般县, 地下水利用率很低, 开采量绝大多数 $< 0.05 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。这类县占大多数。而开采量最低的黔东南州各县地下水开采量多不足 $0.01 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 基本处于未开发利用阶段。各地、州地下水利用的总的情况是: 总开采量 $7.617 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。其中用于农灌 $4.687 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占 61.54%; 用于生活 $1.618 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占 21.24%; 用于工业 $1.312 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占 17.22%。

贵州省城市地下水的开发利用是从 20 世纪 60 年代中期随着“三线”建设和城市发展而逐步增长的。地下水开发重点地区主要是贵阳市、六盘水市、安顺市、凯里市、都匀市等省内大中城市及国家重点工程和重要矿山分布区。省内现有大、中型水源地 31 处(截至 1989 年底), 绝大多数为城市供水服务。打开采井 558 口, 开采总量 $2.0418 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。开采方式除汪家大井、老屋等 4 个水源地开采岩溶水天然露头外, 其余水源地均以井采为主。开采量达 $0.100 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 以上的城市依次是: 贵阳市 $0.921 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 水城 $0.819 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 遵义市 $0.2001 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 安顺市 $0.1995 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 凯里市 $0.1496 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 六枝 $0.1122 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ (表 8)。水源地开采量以水城盆地最高, 达 $26.39 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$, 六枝最低, 仅占 $6.90 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$; 多数城市地下水开采量在 $15 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$ 左右。上述城市就其水源地地下水开采资源的利用率而言, 以水城盆地最高, 达 78.55%, 其余依次为: 安顺市 68.32%、六枝 52.73%、遵义市 46.52%、盘县 36.17%、贵阳市 34.11%、凯里市 29.01%, 其余城市多在 10%~20% 之间, 只有赤水基本用地表水供水。

表 8 贵州省 6 个主要城市岩溶水开采量统计表

城市名称	贵阳	遵义	安顺	凯里	水城	六枝	总计
开采量($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	0.921	0.200	0.1995	0.1496	0.819	0.1122	1.95
利用率(%)	34.11	46.52	68.32	29.01	78.55	52.73	

城市地下水开采量的利用情况, 据贵阳市、六盘水市、遵义市、安顺市、凯里市、都匀市以及瓮福磷化基地等 7 个城市(矿区)的统计(表 9), 共计开采地下水量 $2.1386 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。其中: 生活用水 $1.016 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 占总用水量的 47.51%; 工业用水 $0.759 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 农灌用水 $0.364 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 后者占用水量的 17%。

表 9 贵州省 7 个主要城市(矿区)岩溶水开采量分配统计表 单位($10^8 \text{m}^3/\text{a}$)

总开采量($10^8 \text{m}^3/\text{a}$)	生活用水	工业用水	农灌用水
2.14	1.016	0.759	0.364
所占百分比(%)	47.51	35.49	17

注: 7 个城市(矿区)除表 8 中前 5 个城市外, 再加都匀与瓮福。

在城镇及工矿区附近, 地下水污染问题较为突出, 特别是有的地区岩溶水的水质明显变坏。根据现有水质监测资料, 贵阳、遵义、安顺、水城、凯里及都匀等省会、地州城市的岩溶地下水都不同程度受污染, 致使一些机井及岩溶水天然露头水质变坏。这几年来黔西南岩溶区开发生金矿, 采用土法浸取, 排放含氰化钾的废液, 已对该地区的岩溶地下水造成严重污染。

3.3 水资源潜力分析

据贵州地矿厅的统计分析, 贵州地下水天然资源总量为 $479.39 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 其中岩溶地下

水为 $386.26 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 非岩溶地下水为 $93.10 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。岩溶地下水已开采量为 $22.22 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 仅占其天然资源总量的 5.7%; 若加上水力发电的 $18.4 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 其开发利用量也仅为天然资源量的 10.5%。非岩溶地下水的开发利用十分零星, 基本上没有集中的取水工程。若按 60% 的地下水天然资源用于维持区域性的生态基流量, 则全省尚有约 $190 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的地下水可供利用。

贵州地下水可采资源量, 采用枯季流量大于 5L/s 的大泉及地下河统计, 以及相关天然资源量等的资料分析, 概算为 $131.26 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 其中岩溶水可采资源量为 $122.88 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 非岩溶水为 $8.38 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。根据现有开采量计算, 全省地下水的开发利用率为 16.93% (不包括发电用水); 而岩溶地下水的开发利用率为 18%, 尚有 82% 的岩溶水可采资源没有利用。必须着重指出的是, 从长远的水资源开发观点看, 按照现阶段经济技术条件确定的地下水可采资源量显然是偏低的。这是因为: 其一, 根据若干水源地的勘探资料及开采现状, 岩溶地下水的开采量一般可占天然资源量的 50% 以上; 其二, 随着社会经济的发展和开采技术的进步, 地下水可采资源量的计算或统计数值也必将显著增加。据此可以认为, 全省地下水可采资源量至少应该大于 $140 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

综合以上天然资源及可采资源两部分潜力分析, 贵州地下水的可开发资源量至少应达 $150 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 全省至少尚有 $125 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的岩溶地下水资源可开发利用。

4 广西岩溶水资源及其开发利用

4.1 岩溶水资源概略统计

广西地处亚热带季风气候区, 气候温暖湿润, 雨量充沛, 地表水、地下水资源十分丰富。但大面积的岩溶连片分布, 除形成举世闻名的桂林、都安等地的热带岩溶地貌景观之外, 也造就了境内地表水资源与居民、耕地严重分离的自然环境, 水资源开发利用难度大, 利用程度低。受岩溶地下水分布特征的影响, 地下水利用程度也很低。

广西全境面积 $23.67 \times 10^4 \text{km}^2$, 岩溶区面积达 $9.6 \times 10^4 \text{km}^2$ 以上, 约占总面积的 41%。岩溶地下水多年平均补给量达 $484 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 可采资源按枯季径流模数法计算达 $148.11 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 地下水资源十分丰富。初步统计, 在广西长度大于 2km 并独立存在的地下河有 435 条, 总长度 1 万多千米, 平均分布密度 $0.1 \text{km}/\text{km}^2$, 枯季排泄量 $191 \text{m}^3/\text{s}$ ($60.24 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)。地下河的数量、规模, 以桂西峰丛洼地区最多、最大, 峰林谷地区次之, 平原区最少, 且规模较小。除地下河外, 广西的岩溶大泉也很多, 总计达 700 多个, 枯季流量大于 $52.3 \text{L}/\text{s}$ 的大泉 296 个, 总流量 $52.3 \text{m}^3/\text{s}$ ($16.524 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)。

4.2 关于岩溶大泉、地下河允许开采量的探讨

南方岩溶的重要特征之一是年内或年际地下水动态变化剧烈, 丰、枯季的流量相差极大。过去在普查阶段, 往往把年均枯季流量作为可利用资源量, 这主要是从高保证程度考虑, 而未考虑岩溶水具有较高的多年调节功能。因此, 如何正确评价岩溶水的可采资源, 成为当前一个值得探讨的问题。钱小鄂在《中国岩溶》(2001 年 6 月) 发表的文章中, 根据 24 个水源地有关数据的分析, 认为允许开采量均远远高出按枯水径流模数法的计算结果。

广西 435 条地下河及 700 多个岩溶大泉的枯水径流量分别达 $191 \text{m}^3/\text{s}$ 及 $52.3 \text{m}^3/\text{s}$, 换算成径流量则分别达到 $60.234 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 及 $16.524 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 但这些数据并未反映出地下河和大泉丰、枯流量的变化。据对典型地下河、大泉长期观察资料表明, 地下河、大泉丰季水流量

分别是枯季流量的 12 和 10 倍,平水季则分别是枯水季的 2.0 和 1.8 倍。如丰季取 120 天,平季取 180 天,枯季取 65 天,则上述大泉及地下河的年径流量将达 $375.28 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,为岩溶地下水天然补给量 $484.48 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的 77.4%。据统计,丰季地下河及大泉水资源分别达 $237.63 \times 10^8 \text{m}^3$ 和 $54.22 \times 10^8 \text{m}^3$,分别占地下河、大泉年总资源的 77.7% 和 73.8%。而雨季丰富的补给量,枯水径流模数法计算的允许开采量是未予以考虑的,因此该法的局限性也显而易见。事实上,根据广西许多城镇、工矿及农村水源地的统计,运用多种方法(包括地下水动力学、数值法等)计算的地下水允许开采量,均较枯水径流模数法的结果有较大的提高。根据 24 个水源地的计算结果,其平均地下水允许开采量等于地下水天然补给量的 61.72%,与正态分布的众值的比例相当,是以前测定的全区地下水允许开采量的 2 倍。

4.3 岩溶水资源潜力分析

据广西水利厅 1998 年统计(钱小鄂,2001),广西全区水资源利用总量为 $290.5 \times 10^8 \text{m}^3$,约为全区水资源多年平均量($1880 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)的 15.45%,其中地下水资源利用量为 $12.7 \times 10^8 \text{m}^3$,仅为前述地下水允许开采量的 5.3%。按经济区统计,广西水资源利用程度较高的有桂西、桂东南两个经济区,其水资源利用量已超过了区内水资源的 20%,分别达到了 21.38% 及 20.39%。从地质背景看,上述两区均为非岩溶区;以岩溶为主的桂西、桂中经济区,水资源利用量占水资源总量仅为 10.18% 及 14.72%(表 10)。

据有关专家估计,表 10 列出的地下水开采量比实际偏小。其原因一方面是地下水开采规模较小且分散,故难以统计;另一方面,一些地方水利部门往往把引泉、引地下水等工程列入地表水工程范畴,因此也自觉不自觉地压低了地下水开采量。据广西水文地质队对桂中经济区的有关县市调查,仅柳江(地下水年开采量 $2235 \times 10^4 \text{m}^3$)、柳城(年开采量 $4790 \times 10^4 \text{m}^3$)、忻城(年开采量 $3711 \times 10^4 \text{m}^3$)3 县的地下水年开采量就达 $1.07 \times 10^8 \text{m}^3$ 。因此,表 10 列出的桂中经济区每年 $1.1 \times 10^8 \text{m}^3$ 的地下水开采量显然偏小。有关专家估计,广西地下水年开采量应在 $25 \times 10^8 \sim 30 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右,这一数字,与广西地质勘探开发局许多专家的估计比较吻合。

表 10 广西五大经济区实际供水、用水统计表 (单位: $\times 10^8 \text{m}^3$)

分区名称	实际供水量			合计	占区内水资源总量的比例(%)
	地表水	地下水	其他		
桂东经济区	74.91	3.9	1.03	79.84	20.39
桂南经济区	54.53	2.9	3.05	60.48	21.38
桂西经济区	57.34	2.3	2.17	61.81	10.18
桂北经济区	46.16	2.5	0.05	48.71	14.78
桂中经济区	38.50	1.1	0.05	39.65	14.72
小计	271.44	12.7	6.36	290.50	

注:据《广西生态建设规划》(广西生态环境规划组,1999)报告整理。

如果按 $25 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的数字推算,则广西地下水开采量约占全区水资源利用总量的 8.57%,为前述地下水允许开采量的 10.44%。这一比例,与我国地下水开发利用程度较高的地区相比(后者多在 30%~50%),广西地下水资源开发利用程度偏低。退一步讲,即便按前人比较保守的枯季径流计算的地下水允许开采量 $148.11 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 计,广西地下水开采量也只占地下水允许开采量的 16.9%,远远低于全国平均约 30% 的比例。广西岩溶地下水开采利用潜力很大,这一结论应是毋庸置疑的。

广西岩溶地下水资源丰富,特别是雨季补给量大,地下岩溶储水空间大,调节性强。因此,

岩溶地下水允许开采量评价,应充分利用雨季丰富的补给量及地下岩溶水库的调节性。按上述基本思想并考虑地下水开发利用的经济、技术、生态环境等约束性条件,以及对比广西一些地区已经开发利用的若干水源地参数,采用比较法,初步评估广西岩溶地下水允许开采量为 $239.39 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,相当于其天然补给量的49.4%。但广西地下水开发利用量仅为 $25 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,约为上述允许开采量的10.44%,地下水开发利用潜力仍然很大。

5 岩溶水开发与石漠化治理

(1)广泛开发利用岩溶水,是改善岩溶地区生态环境与促进经济发展的重要途径。西南岩溶石山地区岩石裸露,水土流失严重,土地退化,具有类似荒漠景观的特征,主要由于岩溶地区脆弱的生态系统与人类不合理的经济活动相互作用造成。初步查明岩溶地区岩石裸露率大于50%的严重石漠化地区面积达 $7.5 \times 10^4 \text{km}^2$,占区域总面积13%,而且石漠化仍在不断加剧。据滇、黔、桂三省(自治区)的统计,石漠化面积每年以 263km^2 的速度增长,当地居民也因土少水缺而石漠化却不断发展,以致生活日趋贫困。西南石漠化地区的分布和发展程度,均与岩溶地质环境密切相关。岩溶地区虽然地表严重缺水,但地下岩溶水相对十分丰富。因此查明岩溶发育规律和岩溶水的分布特征,大力开发利用岩溶水,是解决缺水问题,减缓石漠化发展,逐步恢复岩溶生态,改变这一地区贫穷落后面貌的一个重要步骤。

(2)在严重缺水的峰丛山区,应优先大力发展分布较广的表层岩溶泉,带动农村经济发展。广西马山的弄拉、平果的果化等地的实践经验,足以说明以开发表层岩溶泉为基础,结合封山育林、加强对水源林的保护,提高森林覆盖率,恢复表层岩溶带的调蓄功能和表层岩溶泉的供水功能,调整农业结构,发展高效特色农业等综合治理措施,工程简易,效果明显,能在较短时间内,提高农民生活水平,改善生态环境,并可逐步改变广大山区农村贫穷落后的面貌,走上富裕之路。

(3)西南地区岩溶大泉与暗河流量,约占岩溶水总资源量的80%,因此是开发利用岩溶水的重点对象,对改善生态环境与促进地方经济具有重要意义。根据湘西洛塔,贵州普定、独山等地区开发利用地下河的示范实例,说明除引泉、提水等工程措施外,最重要的一条经验是利用地下暗河修建开发地下水库,并与地表水库相结合,实行地表、地下联合开发,充分发挥地下水库的调蓄功能,不仅能大大提高岩溶水的开发利用率,发挥较高的经济效益,而且结合综合治理措施的运用,有利于扩大森林植被的面积,减轻水土流失和洪涝、干旱等自然灾害,促使石漠化向良性循环发展。

(4)大多数重要城镇,都分布在地形比较平坦的峰林平原或断陷河谷盆地内,是西南岩溶地区农业用水和城镇、工业用水消耗量最大的地区,也是目前经济相对比较发达,岩溶水开发程度相对较高的地区。岩溶平原浅层岩溶水系统,一般埋藏浅,降水、地表水、地下水交替强烈,补给条件好、汇水面积大,岩层岩溶化程度高,岩溶水资源十分丰富,开采条件十分有利,已成为许多重要城市的主要供水水源。例如贵州省贵阳、安顺、遵义、六盘水等城市,岩溶水的利用率已达30%~50%,其中安顺与水城已分别达到68%与78%。因此,随着工业和城市建设的迅猛发展,需水量必然与日俱增。为了防止发生超量开采,如何扩大和开拓新水源地,以满足经济日益发展的需要,已是当务之急。另一方面,工业废水与城市生活污水不合理的排放,以及农田大量施用农药化肥,已对岩溶水造成严重威胁。浅层岩溶水的大量开发,还容易导致岩溶塌陷等地质灾害,因此为了防治水污染与岩溶塌陷等地质灾害,必须加强水资源的科学管

理。

(5)西南岩溶石山地区,降水丰沛,但大部分渗入地下,地表水贫乏,而地下岩溶水相对丰富,可是岩溶水的利用率很低,例如广西岩溶水的开采量,仅占其资源量的15%~20%,贵州的开采量仅占其资源量的10%~15%,因此蕴藏巨大潜力。岩溶水利用率偏低,主要存在以下两方面原因:一是大部分地区经济落后,生活贫困,缺乏工程投资;二是岩溶地质条件十分复杂,不论开发暗河或岩溶平原的浅层岩溶水,都需要开展详细的地面勘察工作,包括钻探、物探、遥感、示踪试验、同位素技术等勘察手段。因此开发利用岩溶水,如果得不到政府的支持,是很难取得效果的。

(6)为了有计划有步骤开发利用岩溶水,必须根据点面结合和轻重缓急的原则,开展区域性的岩溶生态环境地质调查,同时进行重点地区的详查工作,两者紧密配合。在此基础上,制定全区岩溶水的开发利用规划。对重大工程,例如大型城市供水或建立大型地下水库,都应设立专项开展正规的勘探工作,加强科学研究,依靠科技进步,开拓创新。大力推广示范工程的成功经验,因地制宜,采取各种不同的开发方式。国家在投资方面也可采取多种形式,并充分给予优惠条件。例如采用政府投资、地方投资、民间投资相结合的方针,通过不同渠道,如勘探投资、工程投资、扶贫投资、水利投资以及科研投资等,尽量创造有利条件,使各方面工作都能顺利进行。石漠化地区的生态重建,是一项长期性的艰巨任务,涉及面很广,需要实行多学科互相协作,共同努力。

参考文献:

- [1]韩至钧,金占省.贵州省水文地质志.北京:地震出版社,1996
- [2]张之淦,陈伟海.岩溶蓄水构造与找水.水文地质工程地质,2000(176)
- [3]钱小鄂.广西岩溶地下水资源及允许开采量的探讨.中国岩溶,2001,20(2)
- [4]张卫,覃小群,易连兴等.西南岩溶区岩溶水有效开发利用规划分区.中国岩溶,2001,20(1)
- [5]苏作词,朱文孝,熊康宁.贵州喀斯特山区的石漠化及其生态经济治理模式.中国岩溶,第21卷第1期,2002
- [6]李兆林,劳文科,罗伟权.湘西洛塔岩溶水的综合开发与持续利用.中国岩溶,2002,21(4)
- [7]王宇.西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点.中国岩溶,2002,21(2)
- [8]郭芳,姜光辉,裴建国等.广西主要地下水水质评价及其变化趋势.中国岩溶,2002,21(3)
- [9]陈梦熊,马凤山.中国地下水资源与环境.北京:地震出版社,2002
- [10]卢耀如,地质-生态环境与可持续发展.天津:河海大学出版社,2003

KARST WATER RESOURCES AND THE TREATMENT OF KARST ROCKY DESERTIFICATION IN KARST AREAS OF SOUTHWEST CHINA

Chen Mengxiong

(Consulting and Research Center, Ministry of Land & Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Carbonate rocks are widespread in South China, especially in the southwestern part, where they make up more than 1/3 of the total area. The karst strata are mainly of Palaeozoic and partly Triassic limestones with great thickness, which form hills and mountains showing wonder-

ful karst landscapes. Karst features are extensively developed. Although rainfall is plentiful, however, owing to the development of fissures and cavities of carbonate rocks, rainfall penetrates fast into the ground to become groundwater. Thus most valleys on the land surface become dry, causing serious deficiency of surface water, while in the underground, the runoff is mostly concentrated in the karst tunnels to form underground streams which in turn constitute an underground stream system, chiefly controlled by the tectonic conditions. Now many engineering measures have been taken to exploit the karst springs or underground streams in different ways, such as constructing channels or building underground reservoirs. These projects are playing important role effectively promoting the economic development as well as improving the vulnerable ecoenvironment of karst area. This paper has been discussed the potentials of the karst water particularly in focus on Guizhou province and Guangxi autonomous region. Some typical examples have been given in relation with the rational exploitation and utilization of the karst water.

Key words: Karst water; Large karst spring; Underground streams; Underground reservoir; Rocky desertification