

王宇. 云南省地下水资源潜力评价现状与问题分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 137-146.
DOI: 10. 11932/karst20200201

云南省地下水资源潜力评价现状与问题分析

王宇^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 云南省地质调查局, 昆明 650051)

摘要:在系统梳理云南省地下水资源调查评价和开发利用历史与现状的基础上, 阐述了地下水资源潜力评价方法及结果, 云南省县级以上城市所在的山间盆地地下水开采利用率大多达30.32%~51.49%, 广大山区为9.63%~30.00%, 现状地下水资源潜力为 $134.48 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。目前基础性的水文地质调查研究程度为普查阶段, 在滇西北、滇西地区还有大面积的空白区, 故全省性及区域性的地下水资源潜力评价成果只达到推断及预测的精度, 此次系统地分析了其中存在的主要问题为对水资源及环境系统认识不清、评价内容和标准不全、水质水量动态监测预报不足等, 并提出解决问题的对策。

关键词:地下水; 开发利用程度; 潜力评价; 云南

中图分类号: P641.8 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2020)02-0137-10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

随着人口的大量增长和经济社会的快速发展, 与其他自然资源的开发利用状况一样, 无论是天然出露的泉、地下河出口等水源地或是隐伏的富水块段, 开发经济技术条件较好的部分大多都不同程度地得到了开发利用。因此, 实践中常常需要了解的是地下水资源还有多少潜力可挖。地下水资源潜力就是指地下水现状开发利用条件下可供扩大开采的地下水可开采资源量。按照《水文地质调查规范(1:50000)》(DZ/T0282-2015)9.3.1.5的规定, 地下水资源潜力的值为: 评价区域或含水层的地下水可开采资源量减去实际开采量所得的差值。对于已经完成勘查评价, 但尚未投入开发的地下水源地则就是地下水的全部可开采资源量。本文在系统梳理地下水资源调查评价和开发利用历史与现状的基础上, 阐述了地下水资源潜力评价方法及成果, 分析了

其中存在的主要问题, 提出解决问题的对策, 以期开展新一轮水资源调查评价奠定基础。

1 水文地质调查研究进程

云南的水文地质调查研究始于近代, 始终是紧跟国内外学科发展和社会需求而不断推进的。以地下水资源评价为目的或基础性的调查研究工作主要有:

1958-1973年期间, 在昆明、宣威、曲靖、文山、元谋、平远街、广通、禄丰、戛洒-漠沙、宾川等城镇、矿山、交通干线和干旱缺水地区开展了水文地质普查和富水块段供水水文地质勘查。

1974年开始, 按照地质部的统一部署, 开展了1:20万区域水文地质普查。到1982年, 共完成1:20万水文地质普查42个图幅, 面积共 $30.64 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省总面积的77.77%, 其中泸水、盈江、凤庆、耿

基金项目: 国家重点研发计划项目“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范”(2016YFC0502500)

作者简介: 王宇(1960-), 男, 博士, 研究员, 主要从事水工环地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2020-01-06

马、江城、雷波等图幅为1:50万精度。1994-2003年,对未完成1:20万普查的滇西北怒江州、迪庆州、丽江市北部,滇西南的临沧市,云南省地矿局补作了1:50万的区域水文地质编测(图1)。地下水资

源评价主要以降水入渗系数法、径流模数法估算地下水平均补给量和径流量^[1]。其成果至今仍是科研、规划、勘查开发和管理等工作利用率最高的资料。

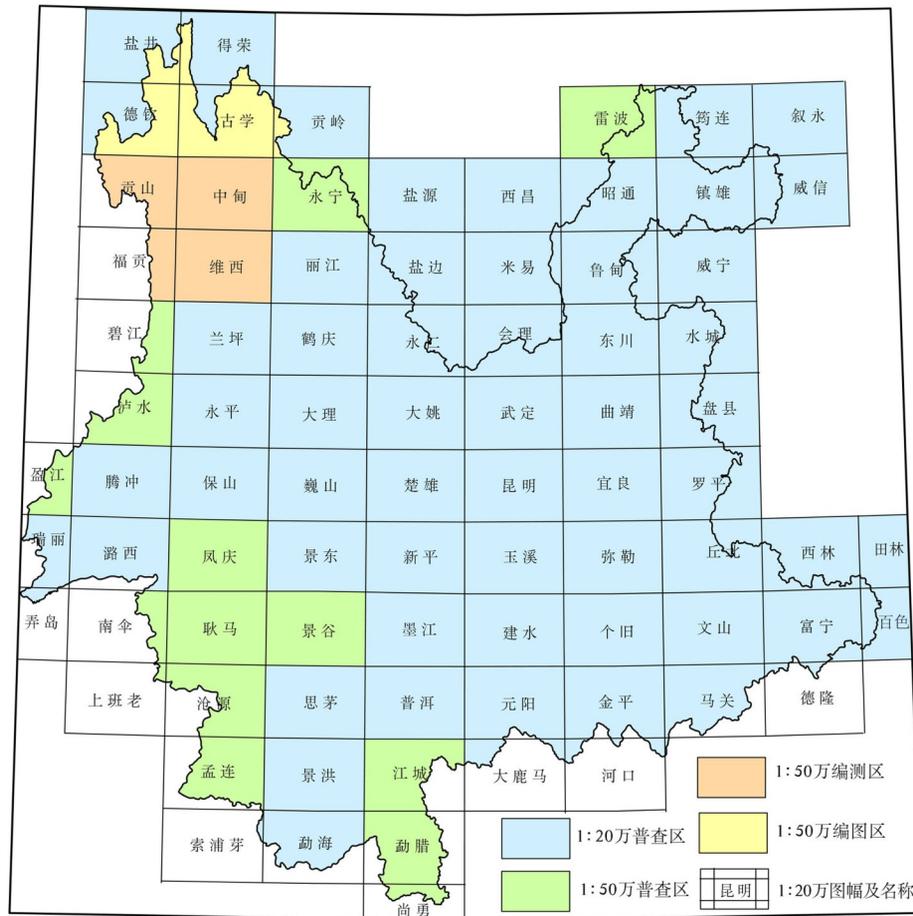


图1 云南省1:20万水文地质普查区分布图

Fig. 1 Map showing distribution of 1:200,000 hydrogeological survey areas in Yunnan Province

1978-1996年,地质矿产部相继安排进行了昆明、曲靖、玉溪、楚雄、大理、保山、宾川、祥云、蒙自、开远、个旧、建水、陆良等主要盆地的1:5万水文地质普查或水工环地质综合普查^[2];1997-1999年,进行了昆明、楚雄、元谋、嵩明、陆良、通海、开远7个县(市)1:10万区域水文地质调查。结合社会需求,对其中的呈贡吴家营水源地、安宁下石江水源地、沾益烂泥海子水源地等进行了供水水文地质详查或勘探。

1999年开展新一轮国土资源大调查以来,按照中国地质调查局的部署,完成了西南岩溶石山地区滇东一攀西片区地下水资源勘查与生态环境地质调查(1:25万),持续开展了云南重点地区岩溶水文地质及环境地质调查(1:5万)(图2)。1999-2002年完

成的1:25万调查,云南省主要调查区为东经102°以东、元江以北的滇东岩溶区,在1:20万水文地质普查的基础上,采用编测结合带专题研究的方法,侧重调查了近20年来地下水资源的变化及环境地质问题,以流域为单元进行地下水资源计算评价,以降水入渗系数法、径流模数法估算地下水平均补给量和径流量为主,并采用体积法、泉流衰减系数法估算了富水块段储存量及大泉、地下河最枯水位以上的储存量,用泉、地下河流量观测统计分析及盆地覆盖区断面法估算评价了可开采量,再结合地下水开发利用现状调查,初次估计了地下水资源潜力^[3]。

2003年至今持续开展的1:5万水文地质及环境地质调查,主要部署在重要经济区、老少边穷地区、石漠化严重及干旱缺水等地区的重点岩溶流域,已

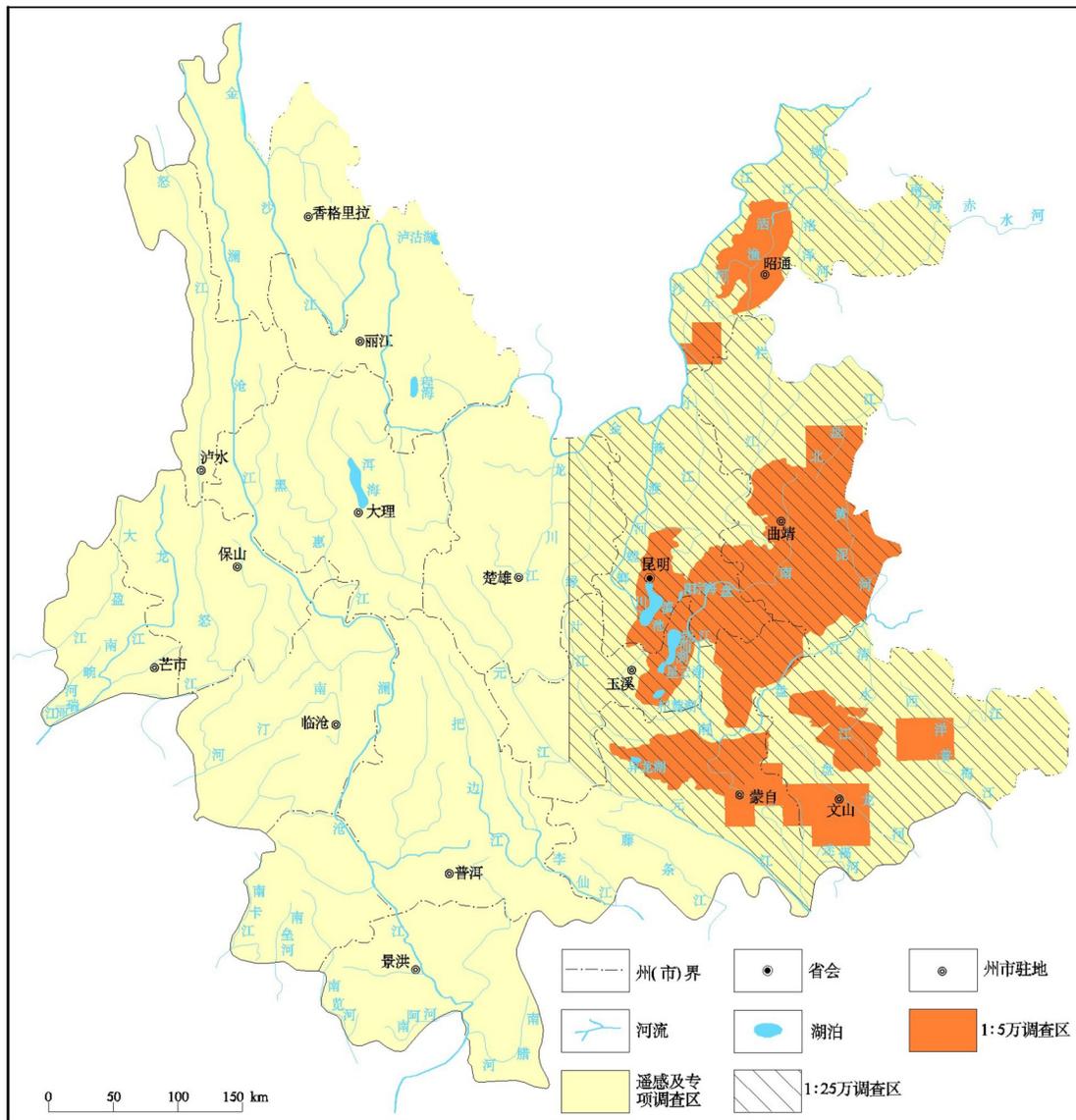


图2 云南省 1 : 25 万和 1 : 5 万水文地质调查区分布图

Fig. 2 Map showing distribution of 1 : 250,000 and 1 : 50,000 hydrogeological survey areas in Yunnan Province

完成调查面积共 46 107.6 km²。按 1 : 5 万地形图幅进行野外调查,以岩溶流域为单元进行地下水资源评价,以降水入渗系数法计算了不同经验频率降水的补给量,并采用体积法、泉流衰减系数法计算了富水块段储存量及大泉、地下河最枯水位以上的储存量,用流量观测统计分析计算了泉、地下河可开采量,用理论和经验公式计算了富水块段的可开采量,再结合地下水开发利用现状调查,估算了地下水资源潜力。

云南水文地质调查基本覆盖了全省,但总体调查精度偏低,参差不齐,故地下水资源评价成果的准确度、可靠性差距也比较大。

2 地下水开发利用状况

云南的地下水源地类型主要为天然出露的泉、泉群、地下河出口、天窗、溶井、支洞等,以及隐伏的富水块段潜水和承压水含水层(带)。有史以来地下水的开采利用就已经非常广泛,泉、地下河出露点引水、提水设施以及各种浅井、斜井、坑塘、沟廊等地下水集水取水工程遍布各地。在高原季风气候区,地下水以分布广、水质良好、动态稳定、取水就近等优点而成为重要的生产生活用水水源,尤其是在旱季抗旱供水扮演着不可或缺的角色。

引、蓄和抽取泉水以供生产生活之需,是地下水开发利用的最普遍方式。近现代意义上的泉水开发

利用工程,最典型的当数云南自来水股份有限公司五华山自来水厂,该水厂以昆明翠湖中九龙池岩溶泉群为水源,在五华山西坡建设调蓄水池、水处理设施及公司基地,1918年5月2日正式送水,日供水量为 $1\,034\text{ m}^3$ ^[4]。在20世纪70年代初,九龙池泉群因地下水开采及人防工程排水影响,流量逐渐衰减,至1974年完全断流,优质水源消失至今未能恢复。据水利部门统计,2016年昆明市地下水实际开采量为 $36\,816.02\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,以利用泉水为主,井采为辅。其中,泉水利用量达 $31\,110.28\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,占实际开采量的84.5%;水井实际取水量为 $5\,705.74\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,占实际开采量的15.5%。为了解决岩溶高原山间湖盆区水资源紧缺的困局,玉溪市政府以云南最大的岩溶泉—华宁县盘溪大龙潭为水源兴建了玉溪市东片区暨“三湖”生态保护水资源配置应急工程。盘溪大龙潭流量在 $1\,880\sim 10\,900\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,设计引水流量为 $2.5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,年引水量为 $7\,013\times 10^4\text{ m}^3$,分为三级提水,提水总扬程为943.28 m,输水线路总长154.8 km。2014年1月初动工,2015年5月31日成功实现全线

一次性调水,这是云南调水成本和技术难度最大的泉水开发利用工程。而构筑坝塘水库,调蓄泉流动态变化,以提高地下水资源的利用率也是常见的地下水开发利用方式。最具代表性的为昆明市的大型水源地松华坝水库,最早是由赛典赤率民众于1276年,在凤岭、莲峰两山箐口首次修建松华坝,并于坝上设置闸门以时启闭^[5]。后于1946年在松华坝上游7 km左右的芹菜冲修建了谷昌坝水库,总库容为 $220\times 10^4\text{ m}^3$ 。1958年在松华坝旧址筑坝建库,新建成现今的松华坝水库,库容为 $6\,700\times 10^4\text{ m}^3$ 。20世纪80年代后经多次加固扩建,目前库容达 $2.19\times 10^8\text{ m}^3$,控制径流面积为 629.8 km^2 ,年均向城市供水 $1.5\times 10^8\text{ m}^3$,如今谷昌坝水库在高水位时已被松华坝库水淹没^[6]。松华坝水库汇水区共有137个地下水天然出露点,其中包括4个流量大于等于 $50\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大泉和6条地下河(表1),地下水总排泄量在 $3\,489.11\sim 11\,736.92\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ^[7]。这些泉和地下河水尽数汇入松华坝水库中,通过供水管线输送至用户,得到了全面的开发利用。

表1 松华坝水库流域岩溶大泉及暗河概况

Table 1 Outline of large karst springs and underground rivers in the Songhuaba reservoir basin

名称	类型	高程/m	长度/km	流量/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	备注
青龙潭	岩溶大泉	1 984.95		1 078.76	
黑龙潭		1 972.74		320.51	
双哨龙潭		2 138.20		64.72	
刘家坟龙潭		2 010.73		64.40	
黄龙洞暗河	岩溶地下河	2 317.07	>2	24.30	
龙洞暗河		2 100.00	4.5	56.00	
河东暗河		2 115.00	1.5	19.80	
冷水洞暗河		1 988.52	>2	0~8 670.00	季节性
刘家洞暗河		1 956.43	0.5	0~267.36	地下河
前石洞暗河		1 955.30	2.5	22.20	

对地下河以引、提、堵、蓄的方式进行了广泛的开发利用,引、蓄开发利用和前述的泉水开发相似,但通过地下河天窗、分支溶洞提水和建设地下水库调蓄开发利用则需另作详解。(1)丘北县六郎洞地下河水库是中国第一座地下河水库电站。六郎洞地下河流域面积有 $2\,064\text{ km}^2$,年径流量在 $6.584\times 10^8\sim 7.981\times 10^8\text{ m}^3$,多年平均为 $7.47\times 10^8\text{ m}^3$,是我国南方4条超大型地下河之一。其地下水库采用钢筋混凝土封堵溶洞,堵体下作帷幕灌浆防渗加固而成。堵洞后洞内水位抬高14.5~18.0 m,在正常蓄水位1 086.0 m高程以下库容约 $27.1\times 10^4\text{ m}^3$,有效库容有

$23.74\times 10^4\text{ m}^3$ 。其在1958年2月开工兴建,1960年2月竣工投产发电,装机容量为 $2.5\times 10^4\text{ kW}$ 。(2)文山县白石岩地下河流域面积约 680 km^2 ,出口位于盘龙河右岸的白石岩下,据1994~1996年动态观测,其流量在 $1.53\sim 23.5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。柳井分支溶洞发育于其出口上游约11 km处,洞内弯折陡急,沿溶洞斜深602 m见水流,水位埋深121.2 m,枯季流量为 $33.75\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。1995~1999年兴建地下水库,坝址选在洞内116 m处厚15.2 m的钙华坝上,通过堆置块石,浇灌混凝土、预埋过水管、迎水面覆膜隔水、高压灌浆防渗处理后,分期浇筑混凝土坝至1 142 m高程直到封顶,最后

建设坝后式地下电站发电,最终抬高水位126 m,有效库容为 $2\,353\times 10^4\text{ m}^3$ 。1999年在上游柳井分支溶洞,经开凿铺设提水管560 m,至高位水池,提水总扬程为181.2 m,提水量为 $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,此为岩溶山区群众提供了三七种植和抗旱用水。(3)马关县水淹坝暗河天窗上口直径为25 m,下部直径为5 m,枯季水位埋深35 m,水深约28 m,雨季水位上升可淹没天窗所在洼地。2010年夏天所建抗旱提水工程,水泵提水扬程约195 m、流量为 $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,在石峰1 530 m高程处修建容积为 100 m^3 的调节水池,最远输水距离8.3 km,此为岩溶石山区严重干旱缺水的21个村寨和1个村级完小提供了抗旱应急用水。云南地下河开发利用工程众多,还有开远南洞地下河提引水、蒙自五里冲盲谷无坝水库、曲靖水城地下河调蓄水库、罗平四方石暗河天窗截流壅水等^[8]。

打井汲水在云南最早的考古发现是在晋宁区上蒜镇金沙村上西河遗址发掘出的13眼古井,年代距今有2000多年,迄今在平坝、槽谷、洼地、台地、阶地等具备条件的地区,村村寨寨都能找到历史悠久、人工挖掘的大口径民井。但钻凿管井取水则仅有一百多年的历史,仍有据可考的当属1910年竣工的滇越铁路沿线车站遗留的少量老机井,如华宁县青龙镇禄丰火车站仍在使用的机井。云南解放后,城镇、交通、工矿企业、学校医院、国营农场、部队营区等建设快速发展,远离地表水源的地区,越来越多地开始钻凿机井取水。20世纪70年代中期至90年代末,云南省地矿局在师宗、陆良、宜良、石林、蒙自、建水、宾川、祥云等干旱缺水地区开展支农抗旱找水打井,通过探采结合钻凿了一大批农田供水机井。云南打井取水自20世纪70年代起一直保持加速上升的趋势,多以自备单井分散取水为主,开采井的调查登记比较困难,全省尚缺乏全面准确的数据。而统计登记井数比较全面的有:昆明市2016年登记在册的地下水井有2 171口(含封停井471口),其中,冷水井有2 041口、热水井有130口,当中849口冷水井纳入了地下水应急备用水源规划,年供水能力共有 $4\,373.02\times 10^4\text{ m}^3$ 。宾川盆地记录有机井602口,配套538口,但正常使用的仅有434口,每年抽取地下水 $2\,982.8\times 10^4\text{ m}^3$ 。泸西县机井记录在册的有1 494口,年供水量达 $23.6\times 10^4\text{ m}^3$ 。开远城区、工矿企业及部队等单位供水,主要是机井抽取地下水、引用南洞地下河及泉水,工业生产抽提泸江河水,实际开采地下水 $31\,676\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。而对云南地下水集中供水水源地

勘查评价的不多,代表性的有昆明市吴家营地下水水源地详查、曲靖市花山地下水水源地勘查。吴家营地下水水源地经1989–1991年详查,查明允许开采量有 $76\,356\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,规模为大型。探采结合井曾经作为呈贡县城区的主要供水源地,部分提供给农村作为生活用水和旱季果树浇灌水源,且呈贡新区部分大学和企业在建设过程中也曾打井供水。目前,由于自来水管网已经通达,大部分供水井已停用,仅作为应急后备水源,暗河及泉流主要用于公园景观及浇灌花园等。曲靖市花山地下水水源地1974年底至1975年8月已完成勘查,查明允许开采量有 $3.87\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,属中型地下水水源地。沾益化肥厂依据勘查成果打成开采井5口,合计开采量有 $3\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,以此提供生产和生活用水。由于地下水开采井分布不均,缺乏统一规划和调度,自20世纪70年代中期开始,在昆明、曲靖等盆地底部浅覆盖区因地下水超采诱发了岩溶塌陷、泉水疏干等环境地质问题。以2009年9月1日施行《云南省地下水管理办法》为标志,云南开始实行优先开发利用地表水,在地表水供水管网通达的地区,封停地下水开采井,严格限制审批新井的措施,在省会及州市政府所在城市,地下水的开采水平开始出现实质性下降。

3 地下水资源潜力评价方法及结果

本文的地下水可开采资源与允许开采资源、能利用的地下水资源同义。云南地下水资源潜力评价,可分为全省性和区域性的两个层次。

全省性的地下水资源潜力评价是在2002年,按照国土资源部的统一部署和要求开展的云南省地下水资源潜力评价,根据高原季风气候区的水文水资源动态变化规律,以1:20万水文地质普查资料为依据,选择采用枯季地下水平均径流模数法,针对全省富水性中等及其以上的各类含水层,即平均泉流量大于或等于 $1\sim 10\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 、平均钻孔涌水量大于或等于 $100\sim 1\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 的含水层,进行了地下水可开采资源量计算评价^[9-11],资源评价成果级别主要为D级^[12]。在地下水开采资源量评价的基础上,根据水务管理部门掌握的机井开采量数据,计算得出地下水资源潜力(表2)。这一评价成果是目前公开的、从省级到县级有关地下水资源开发利用及保护规划和管理普遍采用的资源依据。

区域性的地下水资源潜力评价是在1999–2002年,按照中国地质调查局部署和要求开展的1:25万

表2 各地州(市)地下水资源潜力

Table 2 Groundwater resource potential of each prefecture (city)

市(州)	可开采资源量/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	实际开采量/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	开采利用率/%	资源潜力/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$
昆明市	9.46	1.12	11.84	8.34
曲靖市	17.02	1.38	8.11	15.64
玉溪市	4.51	0.30	6.65	4.21
保山市	9.62	0.23	2.39	9.39
昭通市	15.39	0.29	1.88	15.10
丽江市	7.51	0.13	1.73	7.38
普洱市	22.67	0.13	0.57	22.54
临沧市	15.77	0.04	0.25	15.73
德宏州	8.93	0.07	0.78	8.86
怒江州	8.27	0.06	0.73	8.21
迪庆州	10.63			10.63
大理州	8.51	0.53	6.23	7.98
楚雄州	4.06	0.25	6.16	3.81
红河州	15.86	0.65	4.10	15.21
文山州	21.81	1.05	4.81	20.76
西双版纳州	10.33	0.05	0.48	10.28
全省	190.35	6.28	3.30	184.07

云南省岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查中所做的滇东岩溶石山地区地下水资源潜力评价^[13],以及2003年至今仍在持续开展的1:5万岩溶水文地质及环境地质调查中的地下水资源潜力评价^[14]。这些调查评价以地表水三、四级流域为地下水资源评价单元,主要以天然出露的及隐伏的岩溶水源地为核心,采用大泉、暗河流量时间系列分析、钻井经验比拟预测计算涌水量等方法计算评价地下水的可开采资源量,再根据收集资料统计和实际调查的开采量数据,计算得出地下水资源潜力。目前区域性的地下水资源潜力评价工作均未覆盖全省范围,在此只能列出已经完成的1:5万岩溶水文地质及环境地质调查的13个流域的地下水资源潜力评价数据(表3)。从采、补平衡来评价,地下水资源潜力还比较大,总体约为70%,尤其是远离城市的广大山地丘陵区更高。

按照1:5万水文地质调查研究成果分析评价,全省地下水资源开采利用率总体达到29.35%,这个结果是目前时效最近,调查较为详实、涉及面较广的结果。但由于1:5万水文地质调查完成的区域主要在重点岩溶流域,覆盖面仅占全省的11.7%,故

全省地下水可开采资源量,仍只能采用2002年据1:20万水文地质普查资料进行计算评价取得的成果,其中,全省D级以上地下水可开采资源总量为 $190.35 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。按照《水文地质调查规范(1:50000)》(DZ/T0282-2015)9.3.1.5的规定,地下水资源潜力数值为地下水可开采资源量与实际开采量之差,即: $190.35 \times 10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}) \times (1 - 29.35\%)$,计算得出全省地下水资源潜力为 $134.48 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。从全省的抗旱找水打井^[15]及日常打井取水的涌水情况进行经验评价,认为这一成果是较为符合实际的,主要原因是1:5万水文地质调查取得的可开采资源和地下水开发利用调查精度较高,更准确地反映了实际情况。

4 存在问题分析及讨论

上述地下水资源潜力评价结果中,从合理性或准确性来分析,还存在着不少问题或不足,应在今后的水源地勘查评价、建设项目水资源论证、水资源确权登记等专门水文地质调查评价工作中加以解决和补充完善。

表 3 重点流域地下水资源潜力统计表

Table 3 Statistics of groundwater resource potential in major basins

流域名称	可开采资源量/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	实际开采量/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	开采利用率/%	资源潜力/ $10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$
泸江流域	4.46	1.69	37.89	2.77
北门河流域	4.05	0.39	9.63	3.66
南丘河流域	1.15	0.17	14.78	0.98
南盘江源区流域北段	3.02	0.83	27.48	2.19
块择河流域	2.88	0.70	24.31	2.18
多依河流域	3.65	1.29	35.34	2.36
九龙河流域	4.88	1.33	27.25	3.55
滇池流域	2.35	1.21	51.49	1.14
三湖流域	1.13	0.48	42.48	0.65
南盘江石林段、甸溪河流域	4.32	1.31	30.32	3.01
清水江流域	0.10	0.03	30.00	0.07
洒渔河流域	2.18	0.42	19.27	1.76
泸西小江流域	1.60	0.65	40.63	0.95
合计	35.77	10.50	29.35	25.27

4.1 地下水可开采资源评价精度低

4.1.1 勘查控制程度低

地下水资源评价成果的可靠程度,基本上还是取决于水文地质勘查和研究程度的高低。按照现行规范的要求^[12,16],目前全省性和区域性的地下水资源潜力评价工作精度仅达到普查阶段,水文地质填图的比例尺一般为 1:5 万及其以下,达到了概略了解水文地质条件、初步评价地下水资源的研究程度。其地下水资源评价成果的精度为 D 级,可以作为省、州(市)一级制订农业区划或水利建设、工业布局等规划、编制区域水文地质详查或水源地详查设计的依据。普查阶段的调查点线密度、勘探试验等控制程度对于专门用途要求的地下水资源潜力评价而言有不足,如含水层的富水性均以地层统、组、段为单位统一评定和编图表示,忽视了含水层富水性随地形地貌、地质构造、地下水补径排过程改变而发生的变化,对地下水的埋藏分布情况反映不够准确;地下水系统(水文地质单元)边界的圈划依据不足,对于地下水系统边界与地表分水岭的分异^[17]、地下水径流系统的垂向分带^[18]均缺乏基本的钻探取芯、分段抽水试验、示踪试验等探查水文地质结构、观测地下水动力学特性方面的控制和检验,大多依据地表岩溶形态特征和分水岭划分边界,对边界的地下水动力学性质、隔水及输入或输出等功能更是缺少确切的物证和参数。在此基础上计算评价的地下水资源量只能算是概略的估计。因而,把在普查基础上所做

的全省性地下水资源潜力评价成果作为县(市、区)地下水资源开发利用及保护规划,以及将区域性的地下水资源潜力评价成果作为具体项目水资源论证及行政管理的资源依据是不准确的,需根据需求目标和规范要求,进一步补充开展相应精度的水文地质调查(勘查)评价。但按照业界普遍认为的应逐步提高水文地质调查精度,尽早实现全省覆盖的看法,笔者认为对于云南这样幅员辽阔、山高谷深、交通条件差、需求复杂、经济落后的高原山区省份并非合理,应在填补 1:20 万水文地质普查空白区的前提下,选择性开展 1:5 万水文地质调查,同时严格依照规范做好各种针对具体问题与现实需求的专门水文地质调查(勘查),切实提高公益性地质调查队伍的综合研究能力,做好动态监测、编图和数据更新,以为社会提供实时的信息服务。

4.1.2 评价内容不全面

按照可持续发展的要求,地下水可开采资源的内涵不仅仅指具有现实经济意义的地下水资源,还必须满足以下要求:

(1)有补给保证:评价单元内可开采量合计不能超过所要求保证率的补给量。

(2)有储存调节保证:生活和工业供水要求全年不同时期的供水量基本稳定,但在枯水季节,无论地表水或地下水天然径流量将逐渐减小,直到翌年雨季。因此,为了维持连续稳定的供水,还必须要有储存量的调节保证,可开采量不能超过枯季地下水径

流量与储存调节量之和。均衡关系式为:

$$Q \leq \frac{Q_e}{t} + Q_k$$

式中: Q 为可开采量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); Q_e 为可利用的调节储存量 (m^3); Q_k 为枯季需调节时段的平均天然径流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); t 为枯季需要调节时段的时长 (d)。

(3) 有环境安全保证: 按评价所得可开采量进行开采, 不会产生危害性的环境地质现象和影响已建水资源开发工程的正常运营。

(4) 确切评价流域内生态需水量及人类工程活动等对水环境的影响。

第(1)项要求, 已经提供的 1:20 万和 1:5 万水文地质调查评价成果均能基本满足。

第(2)项要求, 除在 1:5 万水文地质调查中作为重点勘查开发示范的部分水源地^[19]或进行专门水文地质勘查的水源地作了枯水期孔群或孔组开采性抽水试验, 并在此基础上预测计算的可开采量隐含了储存量的储存调节保证外, 大多数仅仅采用体积法计算了储存量, 而未与可开采量作相关的分析和评价, 缺失了对含水系统储存调节保证的评价, 从而导致实际开采中常会遇到实际开采量并未超过调查报告计算评价的可开采量, 但在干旱年或旱季却出现了地下水位持续下降, 甚至吊泵断流的现象。

第(3)项要求普遍重视不够, 评价失之宽泛, 致使依据调查报告提交的地下水资源评价成果开发利用地下水, 常导致名泉疏干、景观破坏、地面塌陷等不良环境地质问题。例如, 昆明九龙池、莲花池, 丽江黑龙潭等泉点断流, 昆明、曲靖、安宁等盆地发生岩溶塌陷等。

第(4)项要求的必要性是显而易见的, 以往常忽视了生态需水量或考虑生态需水量不充分, 导致水资源过度开发利用, 天然泉流干涸、溪沟断流、湿地萎缩等, 加剧了流域生态环境的恶化。地下工程开凿和疏排水改变了地下水系统的边界条件和结构关系, 使地下水流场及水资源发生永久性的变化, 削弱了含水层的储存调节功能, 减少了地下水可开采资源量。而工矿企业、城镇建设排污对地下水水质的影响更为常见。对于这一水资源评价要求, 至今在水资源调查评价的实践和理论认识上均已取得了广泛的共识。但目前较为确切的评价工作主要是在建设项目水资源论证、环境影响评价、水源地勘查评价、超长隧道和其他地下空间开凿工程勘查可研中进行的专项评价, 在基础性、公益性的区域调查评价中, 主要流于定性的初步评价, 究其原因主要在于收

集生态、环境、水情、工程技术等相关资料困难; 工作经费有限, 勘探试验、实验测试、动态监测等工作量少, 数据资料欠缺; 技术方法研究较为滞后, 缺乏定量化评价的标准和可行而有效的方法等。

针对上述问题, 首先要转变既有的以查明地下水资源量多少为成果首要评价指标的传统观念, 提高对资源—环境—人类之间相互联系、相互依存、相互作用关系的系统认识, 建立水资源潜力与生态地质环境承载力评价同等重要的意识, 认真按照新的规范要求做好地下水资源的系统评价和与地下水相关的环境地质问题评价, 应深入研究确定明确的生态地质环境约束指标体系, 采取科学有效的方法进行可开采资源评价。并应当系统地研究提出保护地下水资源及环境、预防不良环境地质问题的措施建议, 探讨地下水开采强度与水位下降幅度的限制及监测预警阈值, 以为地下水资源的科学开发利用与管理提供有力的技术支撑。

4.2 地下水开发利用现状了解不确切

表2是收集水务管理部门掌握的机井开采量数据, 经统计分析得出地下水开采利用率为 0.25% ~ 11.84%, 全省平均值为 3.30%; 表3是根据收集当地资料 and 实际调查的开采量数据, 经统计分析得出的 13 个代表性流域的地下水开采利用率为 9.63% ~ 51.49%, 平均值达到 29.35%。前后差异很大, 莫衷一是。究其原因主要有三个方面:

(1) 认识上的分歧。历史上地表水和地下水资源调查评价与管理分属水利和地质矿产或国土资源管理部门负责, 至今仍未完全整合。由于水利部门认为天然出露地表的泉、地下河排泄量均为地表水, 而地质矿产或国土资源管理部门则将其视为地下水。这种认识上的分歧造成了前者统计地下水开采量仅考虑了人工机井、民井开采量, 中国地质调查局组织实施的 1:5 万水文地质调查, 则考虑了两方面的开采量。

(2) 天然与人工复合的水资源系统被人为分割。由于地表水、地下水资源的长期分头管理, 致使在进行地下水资源调查评价时, 地表水、地下水往往是分开进行计算和评价的, 忽略了地下水与地表水的空间分布和转换关系, 以及地下水在水资源配置中的位置, 由此常常造成水资源量重复计算的问题。常见的有: 位于水库汇水范围内的某一或几个泉点, 由于泉流量已经成为了库水来源, 当水库调蓄的水量

已完全纳入了供水系统时,实际该泉流量已经被完全开发利用,其资源潜力应为零。但在实际工作中,单独开展水文地质调查和地下水资源评价时,通常是不加区别地将这样的泉流量作为地下水资源进行计算和统计,这就造成了与地表水资源评价的重复计算,加大了水资源的总量。如果水库调蓄的水量未被完全利用,则应根据水文动态和用水量的变化情况进行分析,合理确定地下水资源潜力。自然资源部成立后,地表水、地下水资源实现了统一管理,今后水资源的确权和管理,必然要求地表水与地下水资源统一调查评价,从而提供科学合理、系统完整的新型水资源评价成果。

(3)调查统计不详尽。实施登记建档、装表计量管理地下水开采井的工作进度参差不齐,因历史和现实的差距,自然及人为的障碍,经济比较发达的城市及周边控制程度较高,而广大乡村零星分散的供水井则很难查清和统计齐全,因此,目前水务管理部门掌握的机井开采量数据尚不全面,1:5万水文地质调查成果也仍然存在不少遗漏。

除了以上普遍性的问题,从水资源评价的系统性和开发利用与管理需要的长期性分析,在某些区域或范围内还存在诸多特殊的问题,在相关流域开展水资源潜力评价时需要进行系统的调查研究,主要为矿产资源开采、交通隧道开挖、输水隧洞开凿、建筑基坑开挖等地下空间开拓与疏排水造成的地下水系统边界、结构及径流场变化,昆明、玉溪、大理及滇中等跨流域调水对区域水循环系统的改变,水土流失及石漠化等生态环境问题造成的径流及运动条件的劣化,地下水天然不良水质及污染等调查评价薄弱^[20-22],水资源与环境监测网点稀疏,动态观测分析和预测评价欠完整和确切等问题。

5 结论与建议

(1)云南县级以上城市所在的山间盆地地下水开采利用率大多达30.32%~51.49%,广大山区为9.63%~30.0%,现状地下水资源潜力为 $134.48 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)基础性的水文地质调查研究程度为普查阶段,滇西北、滇西地区还有大面积的空白区,全省性及区域性的地下水资源潜力评价成果只达到推断及预测的精度。

(3)地下水资源潜力评价存在对水资源及环境系统认识不清、评价内容和标准不全、水质水量动态

监测预报不足等问题,在新一轮水资源调查评价中需加以解决。

参考文献

- [1] 王振江,李伯昂,赵彬,等.1:20万区域水文地质普查报告(玉溪幅)[R].楚雄:中国人民解放军建字733部队,1976.
- [2] 王宇,褚宏俊,毕翔,等.云南省昆明地区螳螂江流域水文地质工程地质普查报告[R].昆明:云南省地矿局第一水文地质工程地质大队,1990.
- [3] 王宇,张贵,张华,等.云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M].北京:地质出版社,2018.
- [4] 肖黎煜,杨萍.民国时期昆明自来水业史话[J].云南档案,2007(4):16-17.
- [5] 黄土杰[清].云南省城六河图说[M].台北:成文出版社有限公司,1975.
- [6] 李应宗,韩兴勇,陈飞霖.松华坝水库外围岩溶地下水影响范围调查报告[R].昆明:云南地质工程勘察设计院,2018.
- [7] 席素芬,金振坤,杨文兴,等.昆明市松华坝水源保护区多学科综合考察地下水专题研究报告[R].昆明:云南省地质环境监测总站,1985.
- [8] 王宇主编.岩溶找水与开发技术研究[M].北京:地质出版社,2007.
- [9] 杨天明,谢英山,毕敬民,等.云南省水文地质报告[R].昆明:云南省地矿局第一水文地质工程地质大队,1982.
- [10] 王宇,黄兴章,谭继中,等.云南省岩溶水有效开发利用规划建议报告[R].昆明:云南省地质矿产厅、云南省计划委员会,1997.
- [11] 杨艳华,朱培秋,和怀忠,等.云南省地下水资源报告[R].昆明:云南省地质环境监测总站,2002.
- [12] GB 15218—94.地下水资源分类分级标准[S].
- [13] 王宇,张贵,李继红,等.云南岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查报告[R].昆明:云南省地质调查院,2002.
- [14] 王宇,张贵,李丽辉,等.云南泸西小江流域岩溶地下水调查与地质环境整治示范报告[R].昆明:云南省地质调查院,2006.
- [15] 王宇,彭淑惠,王梓激,等.云南省抗旱并定井论证方法[J].中国岩溶,2013,32(3):305-312.
- [16] GB50027—2001.供水水文地质勘察规范[S].
- [17] 王宇.岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J].中国岩溶,2019,38(6):823-830.
- [18] 王宇.岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J].中国岩溶,2018,37(1):1-8.
- [19] 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.
- [20] 彭淑惠,黄成,王裕琴,等.昆明市地下水污染调查评价报告[R].昆明:云南省地质环境监测院,2015.
- [21] 王波,于文修,王宇,等.西南地区岩溶地下水污染调查评价(云南)成果总结报告(2011—2015)[R].昆明:云南省地质环境监测院,2016.
- [22] 彭淑惠,王宇,张世涛.昆明岩溶断陷盆地的环境地质问题及治理对策[J].地质灾害与环境保护,2008,19(2):101-102.

Evaluation status and problems of groundwater resource potential in Yunnan Province

WANG Yu^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract Yunnan Province is located in the southwest of China, bordering Vietnam, Laos and Myanmar, with a total area of 394,000 km². The mountainous area of Yunnan Province accounts for about 94% of the total land area. The terrain is high in the northwest and low in the southeast, descending in a ladder form from north to south. The highest point is the Kawagbo peak of Meili snow mountains at the border between Yunnan and Tibet, with an altitude of 6,740 m. The lowest point is at the intersection of the Nanxi river and Honghe river in Hekou county, with an altitude of 76.4 m. The distance between the two points is about 900 km as the crow flies, with height difference over 6,000 m. The general topography of Yunnan is bounded by the Yuanjiang and Yunling mountains, which are divided into two parts. The eastern part is the central Yunnan red bed and the eastern Yunnan karst plateau, with an average elevation of about 2,000 m. Here landform is gentle rolling mountains, low mountains and hills, among which karst faulted basins are prevail. The western part is the longitudinal valley of the Hengduan mountains, with an elevation of about 3,000–4,000 m. It consists of the Gaoligong mountains, Nu mountains and Yunling mountains and the Nu river, Lancang river and Jinsha river, forming a "Three parallel rivers" landform wonder. In the south, the Hengduan mountains and valleys are remaining, with gentle terrain in general, and the river valley is gradually broad. In the border areas in the south and southwest, the terrain is low and gentle, hosting many wide valley basins, generally about 800–1,000 m above sea level, and some sections are lower than 500 m. Yunnan has generally a subtropical plateau monsoon climate, with distinct dry and rainy seasons. Due to the specific geographical conditions, the formation of water resources in space and time distribution is uneven, resulting frequent drought in winter and spring. Regional hydrogeological surveys show that the average runoff of groundwater in the province is 74.274 billion m³·a⁻¹, and the allowable yield of groundwater is about 19.035 billion m³·a⁻¹. Groundwater resources have the characteristics of wide distribution, stable dynamics and excellent water quality, which play an irreplaceable role in daily and drought-resistant water supply. Groundwater resource potential refers to the amount of the allowable yield of groundwater that can be available for expansion under the condition of groundwater exploitation and utilization. The specific value is, the difference between the amount of allowable yield of groundwater resources in the evaluation area or aquifer and the amount of actual exploitation. The purpose of this paper is to accurately evaluate groundwater resource potential in Yunnan Province for the development and utilization of groundwater resources including science planning, protection and management, and provide guidance, in-depth investigation, and evaluation. Our analysis builds on the system science theory, historical analysis, the principle and method of hydrogeology and water balance analysis, abundant groundwater resources investigation data, and dynamic monitoring data. We evaluate and analyze the development and problems of groundwater resources potential in Yunnan Province. In a systematic investigation of the history and present situation, the groundwater resource potential evaluation methods and results are reviewed. The utilization rate of groundwater resources is 30.32%–51.49% in intermountain basins where the cities above country level are located, and that in the vast mountainous area is 9.63%–30.0%. The current status quo of groundwater resource potential is about 13.448 billion m³·a⁻¹. At present, the basic hydrogeological survey is in the general survey stage, and there are still large gaps in the northwest and west Yunnan, so the evaluation results of the provincial and regional groundwater resource potential only reach the accuracy of inference and prediction. For the first time, the main problems are analyzed systematically, such as poor understanding of water resources and the environmental system, incomplete evaluation contents and standards, and insufficient monitoring and forecasting of water quality and water quantity, which lays a good foundation for a new round of water resources investigation and evaluation.

Key words groundwater, degree of exploitation and utilization, potential evaluation, Yunnan Province

(编辑 黄晨晖)