第43卷 第6期	中	国	岩	溶	Vol. 43	No. 6
2024年12月	CARSO	LOGI	CA	SINICA	Dec. 20)24

高瑜,张华,武贵华,等.云南省新一轮地下水资源评价成果[J].中国岩溶,2024,43(6):1248-1260. DOI:10.11932/karst20240603

云南省新一轮地下水资源评价成果

高 瑜^{1,2,3},张 华^{1,2,3},武贵华^{1,2,3},杨 帆^{1,2,3},康晓莉^{1,2,3}, 周俊蓉^{1,2,3},武红梅^{1,2,3},刘海峰^{1,2,3}

(1.云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹),云南昆明 650216; 2.自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室、云南昆明 650216;

3. 云南省地质环境监测院, 云南 昆明 650216)

摘 要:在系统研究云南省水文地质条件的基础上,将云南省地下水系统划分为21个四级流域系统, 41个五级评价单元。文章论述了地下水资源的评价方法、参数确定,并展示了最终评价成果。 2000-2020年多年平均地下水资源补给量为854.66亿m³·a⁻¹,多年平均地下水径流资源量629.16亿 m³·a⁻¹,多年平均地下水径流资源量占地下水资源补给量的73.62%。对223个水质监测点检测结果评 价分析显示:无I类水;II类水9个,占4%;III类水24个,占10.76%;IV类水112个,占50.22%;V类 水78个,占34.98%。受污染的地下水类型多为孔隙水,一般属轻度或中等污染,少部分地区属重污 染;基岩裂隙水,污染程度轻微。主要污染区分布于经济发达、人口密集的城市,如昆明、曲靖、玉 溪、开远、楚雄、大理等地。

关键词:地下水资源;评价方法;计算参数;水文地质;云南高原

创新点:创新性地细化了云南省地下水系统分区,将六级地下水资源区按含水岩组特征进一步细分, 显著提升了评价精度。综合运用大气降水入渗系数法、径流模数法等计算地下水资源量,确保了评价方法的科学性和可靠性。

中图分类号: P641.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4810 (2024) 06-1248-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

云南地处青藏高原东部、云贵高原西部,是以山 地高原地貌为主的省份,全省国土总面积 39.41×10⁴ km²。云南省河流众多^[1],分属于六大水系,即:伊洛 瓦底江、怒江、澜沧江、金沙江、红河和珠江。其主 要支流 180 余条,多年平均产水量约 2011.79×10⁸ m³。 云南省水资源较为丰富,地下水资源具有很大的开 发潜力。但地下水资源空间分布严重不均,因此对 云南省地下水资源进行准确摸底,并对地下水资源 的数量和质量进行评价势在必行^[2]。王宇^[3]研究表 明,目前基础性的水文地质调查研究程度较低,在滇 西北、滇西地区还存在空白区,导致云南省全省性及 区域性的地下水资源评价精度不高。更多的地下水 资源研究主要集中在局部盆地^[4-10],即小区域范围的 地下资源评价、地热水资源评价、供水井等论证评

收稿日期:2023-11-28

基金项目:国家重点研发计划项目 (2016YFC0502502);国家地下水监测工程(WF202000PB);自然资源部/云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室开放基金专项资助(MKGGR2024-2)

第一作者简介:高瑜(1991-),女,学士,工程师,主要从事水文、工程、环境地质调查与研究。E-mail: 993536618@qq.com。

通信作者:张华(1982-),男,高级工程师,主要从事水文、工程、环境地质调查与研究。E-mail: ybddysghs.zhh@163.com。

价。全省水资源评价是 20 年前进行的,现在的水文 地质和水环境等已经有了很大的改变,盆地外流域 调水、重大工程隧道开挖、地下水超采等工程使局 部水文地质条件发生了变化。因此在水文地质勘察 控制程度、完善评价内容方面还需要开展细致工作。 地下水作为极其重要的基础性自然资源,是维系经 济社会发展和国家生态安全的重要战略资源。

本文在系统梳理云南省地下水资源历史资料及 评价现状的基础上,细化地下水系统,对降水、水文 地质参数等进行了更新,并在此基础上开展云南省 地下水资源量评价,分析云南省地下水资源质量及 数据的可靠性,为地下水资源科学开发和利用、云南 国土空间规划提供依据,"以水定城、以水定地、以 水定人、以水定产",多措并举,优化水资源配置和 水旱防御,为相关管理部门决策提供参考。

1 地下水类型特征

云南省地层发育较齐全,元古界至第四系沉积 均有出露。元古界主要分布于滇中、滇西、滇西北 地区,元古界震旦系则主要分布于滇中的昆明、东川 等地,上部以海相碳酸盐岩为主、下部为陆相砂、砾 岩。古生界为海相碳酸盐岩与陆相碎屑岩互层,分 布于全省范围内^[2]。中生界三叠系主要分布在滇东 南地区,中统为巨厚的碳酸盐岩;侏罗系、白垩系主 要分布于滇西的楚雄、大理等地,以红色碎屑岩为主。 第三系分布于互不相连的大小盆地中,为陆相沉积, 下为类磨拉石建造,上部为河湖相含煤建造。第四 系堆积层零星分布。按地下水赋存空隙形态类型, 划分为松散岩类孔隙、基岩裂隙、碳酸盐岩三大类 含水层(图1)。

1.1 孔隙水

孔隙水赋存于第四系、上第三系松散岩类孔隙 中。松散岩类主要分布在山间盆地、河谷区及山麓 边缘地带。面积约占全省国土面积的4.9%。厚度各 地殊异,数米至数百米,乃至上千米。其成因类型在 盆地内以湖相为主,多堆积黏性土夹粉砂层,厚度较 大,富水性一般较差,径流模数一般小于10×10⁴ m³·a⁻¹·km⁻²,无供水意义;河谷区以冲洪积相为主,堆 积有粗砂、砾石层夹粉砂质黏土,厚度一般较小,富 水性中等—丰富,径流模数一般10×10⁴~20×10⁴ m³·a⁻¹·km⁻²,具供水意义者多分布于滇西河谷区和以 冲洪积为主的坝区。孔隙水多为农村居民生活水源, 少部分地区作为城市供水和农业灌溉用水,如元谋、 宾川等地。

1.2 裂隙水

裂隙水赋存和运移于碎屑岩、变质岩和岩浆岩 裂隙中。

碎屑岩主要分布在云南省中部的大姚-新平区 域以及西部的维西-思茅地区,覆盖了全省约 42.1%的面积。变质岩主要集中在滇西的高黎贡山、 哀牢山以及滇中的石屏-易门变质带,面积达 4.92 万 km²,占全省面积的 12.47%。岩浆岩则以临沧、腾 冲、贡山、维西的花岗岩和滇东北、丽江的玄武岩为 代表,面积约为 5.29 万 km²,占全省的 13.44%。这三 类岩石的总面积达到 26.81 万 km²,占全省的 68.02%, 显示出省内裂隙水分布的广泛性。

不同类型的岩石裂隙水具有不同的补给、径流 和排泄特性,其含水量也各不相同,主要受岩石粒度 和裂隙发育程度的影响。碎屑岩和变质岩中的裂隙 水多以层状形式存在,粗粒岩层中的含水量通常较 高,且径流路径较短,具有就地补给和排泄的特点。 在断裂构造发育的地区,裂隙更为发育,地下水丰富, 径流模数可超过 10×10⁴ m³·a⁻¹·km⁻²,这些地下水通常 以泉水的形式集中排泄到沟谷和低洼地带,形成富 水区域,但难以形成大中型水源地。

岩浆岩(主要是滇西的花岗岩和滇东的玄武岩) 多含有风化裂隙水,其含水量不仅与降雨量和植被 覆盖有关,还取决于岩石的风化程度和风化带的厚 度。在强风化带中,岩石多呈土状风化,不利于地下 水的补给和储存,因此含水量较低。而在半风化带 中,裂隙发育且充填物少,连通性好,因此含水量较 高。在其下的弱风化带中,含水量再次降低,径流模 数小于 5×10⁴ m³·a⁻¹·km⁻²。

尚需指出的是滇西腾冲地区新生代喷出岩,既 具有裂隙水特点,又具有熔洞似岩溶形态,地下水呈 裂隙熔洞水这一独特形式赋存,水量丰富。由于分 布面积小,将它归于基岩裂隙水类型中。

1.3 岩溶水

岩溶水赋存和运移于各地质时期形成的碳酸盐 岩的溶孔、溶隙和溶洞中。在岩溶槽谷和溶丘台地,



图 1 云南省含水层类型分布图 (据王宇, 2013) Fig. 1 Distribution of aquifer types in Yunnan Province (Based on Wang Yu, 2013)

岩溶导储水空间形成树形系统,由洞管隙构成,平缓 溶洞管道流与溶隙扩散流共存,展现含水层特征。 如昆明白邑、泸西白水等地,钻井成井率高。盆地和 谷地底部,可溶岩地层长期饱水,地下水溶蚀作用持 久,岩溶发育均匀且深广,形成连通性好的岩溶网络 体系,地下径流主要为慢速二维扩散流,储水空间大, 形成实际含水层。谷地外围峰丛洼地补给岩溶水, 底部为径流区,岩溶水丰富,水位浅,埋深 0.5~4 m, 含水层富水性强。 云南碳酸盐岩类集中分布于滇东及滇西中甸— 大理、保山—耿马地区,面积11.09×10⁴km²,占全省 面积的29%。分布区多为岩石裸露,补给条件好,径 流途径较长,多以大泉或暗河形式集中排泄,富水性 强,其径流模数在10×10⁴m³·a⁻¹·km⁻²以上,强者高达 30×10⁴m³·a⁻¹·km⁻²以上,是形成大中型集中供水水源 地的主要含水岩组。但该含水岩组富水性具不均一 特点,差异很大,尤其以管道流为主的地区差异更大, 增加了开发利用的难度^[11]。

2 地下水资源评价方法

2.1 评价单元划分

云南是山区广布的省份,地下水基本上遵循着 地表分水岭向两侧径流,沿江河谷地排泄,也就是说 除少数岩溶地区地表与地下分水岭不一致外,地表 分水岭即为地下水分水岭,尤其是碎屑岩、变质岩、 岩浆岩广布的滇西地区,每条江河流域及其主要支 流分布的地下水自成体系,形成独立的地下水系统。 故本省六大地表水流域即为六大地下水资源区,其 边界即为地表分水岭^[12]。

由于流域面积较大,同一流域内大气降水和地 貌条件差异较大,地下水补给径流条件也不同,又做 了进一步的划分。

滇西地区,北部江河由北向南径流,山高谷峡, 地下水径流途径短,具就地补给、排泄特点;南部河 谷相对较开阔,水文地质条件也有所不同。故又划 分为南北不同的亚区。

滇东地区岩溶广布,地下水补给、径流条件有独 自特征,面积较大的盆地多分布在该区,往往一个盆 地的汇水范围就是一个比较完整的地下水系统,盆 地区就是地下水富集或排泄区。该区地表径流不发 育,而地下水较丰富,水文地质条件较复杂,它们的 边界或是地表分水岭、地下分水岭,或是阻水边界 (隔水层)。

地下水资源评价单元分区的基本原则主要依据 水利部全国水资源三级分区为基础进行划分,在水 文地质条件复杂区根据汇总需要进行适当修编。地 下水资源四级区划分是在地下水资源三级区的基础 上,依据次级小流域或含水岩组(松散岩类、碳酸盐 岩类、碎屑岩类、岩浆岩类、变质岩类)特征和补径 排条件划分的若干个含水系统,以含水系统作为地 下水资源评价的基本单元。要基本能反映地下水资 源类型和地区的差异,突出地下水资源的赋存与分 布规律,便于分析总结地下水资源的成因和演化规 律。以区域总体含水岩组特征为依据,对于出露范 围较小、对地下水的补径排影响较小的含水岩组进 行合并,尽可能地保持含水系统和地下水流系统的 完整性和统一性,考虑不同区域的工作程度、资料精 度和评价方法的适宜性,兼顾已有的水文站点的分 布。计算各含水系统单元的降雨入渗系数和径流模 数,以六级计算单元的含水系统作为地下水资源评价的基本单元。云南是山区广布的省份,地下水基本上遵循着地表分水岭向两侧径流,沿江河谷地排泄,也就是说除少数岩溶地区地表与地下分水岭不一致外,地表分水岭即为地下水分水岭,尤其是碎屑岩、变质岩、岩浆岩广布的滇西地区皆如此,每条江河流域及其主要支流分布的地下水自成体系,形成独立的地下水系统。故本省六大地表水流域即为六大地下水资源区,其边界即为地表分水岭。逐级划分为21个四级流域,41个五级流域,在各五级流域内根据地下水赋存条件的差异划分41个不同的六级评价单元。本文以六级评价单元内的岩性分区进行水资源计算(图 2),以便准确确定地下水资源计算

2.2 评价方法选择

2.2.1 地下水量

传统意义上岩溶区水文地质调查地下水资源计 算方法主要有大气降水入渗系数法、地下水径流模 数法和泉水流量汇总法^[13-18],但是泉水流量汇总法受 到调查时泉水丰、枯季节的不同和相互之间转化关 系不明确的影响,且碎屑岩地层中水资源量统计完 整性差,计算结果不够准确。本次工作考虑到地下 水资源各分区地貌、岩性、构造的差异以及实际条 件,采用大气降水入渗系数法计算地下水资源天然 补给量,用径流模数法计算地下水允许开采量^[15]。 2.2.1.1 大气降水入渗系数法

本次工作采用大气降水入渗系数法计算不同保 证率下的地下水天然补给量,具体计算公式如下:

$$Q_{\ddagger\flat} = 100 \cdot \alpha \cdot p \cdot F \cdot H \tag{1}$$

式中:

. *O*^{**}—地下水系统天然补给量(10⁴ m³·a⁻¹);

 α —降雨入渗系数(无量纲);

F-地下水系统面积(km²);

2.2.1.2 径流模数法计算

本次工作采用径流模数法计算调查年份的地下 水资源量,具体计算公式如下:

$$Q_{\ddagger \ddagger} = 3.1536M \cdot F$$
 (2)



图 2 云南省地下水资源评价单元划分图 Fig. 2 Division of groundwater resource evaluation units in Yunnan Province

式中:

式中:

$$Q_{\#}$$
—地下水资源量 (10⁴ m³·a⁻¹);

F—地下水系统面积(km²)。

2.2.1.3 地下水允许开采量

地下水允许开采量是指在一定经济、技术条件 约束下,可以持续开采利用,并在开采过程中及开采 后不发生严重环境问题的地下水量,能够维持基本 的生态需水量。本文采用枯季径流模数法计算地下 水允许开采量,计算公式如下:

$$Q_{\mathcal{R}} = 3.1536 \cdot M_{\mathrm{ft}} \cdot \alpha \cdot F \tag{3}$$

$$M_{\rm fth} = \frac{q}{S} \tag{4}$$

*Q*_采—地下水允许开采量 (10⁴ m³·a⁻¹);

 M_{th} 一最枯年枯季地下水径流模数 (L·s⁻¹·km⁻²);

F—地下水系统面积 (km²);

α--保证生态用水量经验系数,本文取 0.67。

- M_{th} —枯季地下水径流模数(L·s⁻¹·km⁻²);
- \bar{q} —观测期内枯水期平均流量(L·s⁻¹);

S—小流域面积(km²)。

2.2.2 地下水质

地下水水质评价按地下水质量标准(GB/T 14848-2017)中的方法进行评价。

本文基于云南省国家级地下水监测工程,对 2021年8月-10月采集的全省地下水样品进行分 析,共采集数据234组,包含223组常规样和11组空 白样。其中孔隙水 72 组,裂隙水 60 组,岩溶水 91 组。 地下水采样、保存和送检严格按照《地下水污染调查 评价规范》。对水样的 37 项指标进行了检测,参评 指标为 31 项。

2.3 评价参数确定

本次评价采用 1960 年以来昭通、元谋、宾川、 曲靖、玉溪等盆地 1:5万水文地质普查、云南重点 岩溶区 1:5万水文地质调查、云南 1:5万水文地 质调查报告中的渗透系数和径流模数,利用气象站 和水文站监测资料修正各评价分区参数。结合降水 量数据计算每个六级计算单元的降雨入渗系数和径 流模数,根据不同评价单元的含水岩组条件、构造和 地貌特征,根据水文站监测数据和泉流量统测数据 进行验证计算,保证每个评价单元的参数真实可信, 计算结果和水文站监测值误差在 10% 以内(表 1)。

3 地下水资源计算成果评价

3.1 地下水量

3.1.1 降水量评价

降水是地下水的补给来源,开展地下水资源评 价需要对多年平均降水量及其空间分布特征进行分 析。云南省降水以降雨为主,仅滇西北、滇东北的部 分高寒山区冬季时有降雪^[18]。本文通过获取国家气 象信息中心 2000-2020 年全省共计 190 个气象监测 站年降雨量数据,进行分析计算,得到各站点多年平 均降雨量值,并绘制了云南省多年平均降雨量等值 线图(图 3)。

全省年均降雨量 1100 mm, 但时空分配不均。 5-10 月份, 降水集中, 降水量占全年的 55%~85%。

		T	able 1 Values	of evaluation	n parameters			
			富水性划分指标				地下水径	地下水径流
含水		地层 -	泉/L·s ⁻¹		地下河出口/L·s ⁻¹		流模数	模数平均值
	关室	17.4	流量	平均流量	流量	平均流量	$/L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$	$/L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$
	较纯灰岩裂	P ₂ <i>q</i> - <i>m</i>	0.01~864.86	3.42	40.53~6 500.00	945.09	4.3~22.15	11.78
	隙溶洞水	$\epsilon_1 q$	0.10~2.20	0.87	135.00	135.00	6.67~8.50	7.12
		S_1sh	0.01~2.97	0.56			2.36~5.21	4.32
		T_2g^2	0.10~60.98	2.65	14.21~5490.00	1455.00	4.58~5.36	4.98
	了估去出家	T ₁₋₂ j	0.05~201.00	4.87	6.73~210.00	62.95	3.00~19.06	8.87
保 路 型 空 流 北 金	个纯伙石浴	$O_3 j$ -w	0.02~50.49	0.45			1.26~4.62	3.43
石俗小百 水岩组	們衣防小	$O_{2-3}sh-b$	0.01~30.52	0.09			0.14~0.82	0.54
111-11		T_2g^1	0.01~68.35	1.23			2.03~2.56	2.27
		T_1y^2	0.01~150.56	2.11	28.00~240.90	100.30	3.07~3.45	
	ムーロゴ	$O_1 t$ -h	0.20~30.20	1.16			5.26	
	日云石九 洞刻附水	$\epsilon_{2-3}l$	0.01~68.61	1.97	510.20	510.20	3.88~5.30	4.85
	們衣你小	€₂g-s	0.01~8.87	1.15			3.40~4.33	
		J_3s	0.01~0.25	0.11			0.52~0.92	
		J_2s	0.01~0.51	0.13			1.32~1.43	
		$J_2 x$	0.05~0.31	0.17			0.83~0.94	
		$J_1 z$	0.005~0.44	0.09			0.85~0.96	
		J_1x					0.52~0.92	
非可溶岩孔	碎屑岩岩	T_3s	0.10	0.10			0.83	
隙裂隙水	孔裂隙水	P ₃ <i>lt</i> -c	0.01~3.40	0.48			3.07~3.86	
含水岩组		$P_2 ls$	0.10~1.83	0.42			2.12~2.85	
		S_1h	0.80	0.80			0.92	
		S_1l	0.513	0.513			0.86	
		$O_{1-2}m$	0.01~10.07	0.85			3.03~3.68	
		€ıj	0.31	0.31			0.90	
	玄武岩(风化)裂隙水	$P_{3}\beta$	0.01~15.60	0.33			0.32	

表 1 评价参数取值表







11月至次年4月,降水少,降水量仅占全年降水量的15%~45%^[19]。

由图可知,云南省降水量由中、北部的元谋、宾 川一线向东、南、西三个方向呈辐射状递增。同时 受地形的影响形成了省内四个多雨区和三个少雨区; 就同一地区来讲,盆谷区雨少,山区雨多。

3.1.2 评价结果

分别对 2000-2020 年每一年和多年平均地下水

资源补给量-径流资源量进行了计算,结果如表2所示。2000-2020年多年平均地下水资源补给量为 854.66亿m³·a⁻¹,多年平均地下水径流资源量629.16 亿m³·a⁻¹,多年平均地下水径流资源量占地下水资源 补给量的73.62%。

如图 4、图 5、图 6所示,长江流域 2000-2020 年 多年平均地下水资源补给量为 181.31 亿 m³·a⁻¹,2000-2020 年多年平均地下水径流资源量 139.42 亿 m³·a⁻¹, 近 21 年中,2011 年长江流域地下水资源补给量最少,

Table 2Comparison of water resource evaluation results in Yunnan Province						
评价时间		地下水补给量/	地下水资源量/亿m ³ ·a ⁻¹			
		$\sqrt{Zm^3 \cdot a^{-1}}$	径流模数法	水文分割法		
2000-2020年(多年平均)		752.440	742.740	761.610		
2000-2020年(多年平均)	线下计算	854.655	629.158			
	栅格分析	872.737	632.102			

表 2	云南省水资源评价结果对比表	



图 4 长江流域 2000-2020 年地下水资源量变化折线图 Fig. 4 Changes of groundwater resources in Yangtze River Basin from 2000 to 2020







图 6 珠江流域 2000-2020 年地下水资源量变化折线图 Fig. 6 Changes of groundwater resources in the Pearl River Basin from 2000 to 2020

为 129.33 亿 m³·a⁻¹, 2016 年长江流域地下水资源补 给量最多,为 219.33 亿 m³·a^{-1[20]}。西南诸河流域 2000-2020 年多年平均地下水资源补给量为 482.58 亿 m³·a⁻¹,多年平均地下水径流资源量 341.06 亿 m³·a⁻¹。近 21 年中, 2011 年西南诸河流域地下水资 源补给量最少,为 413.08 亿 m³·a⁻¹, 2008 年西南诸河 流域地下水资源补给量最多,为 564.45 亿 m³·a⁻¹。珠 江流域 2000-2020 年多年平均地下水资源补给量 为 190.77 亿 m³·a⁻¹,多年平均地下水径流资源量 148.68 亿 m³·a⁻¹。近 21 年中, 2015 年珠江流域地下 水资源补给量最多,为 241.29 亿 m³·a⁻¹。 流域地下水资源补给量最少,为 120.88 亿 m³·a⁻¹。

根据《2020年云南省水资源公报》2020年全省 地下水资源量 619.8 亿 m³, 与 2000-2020 年线下计

表 3 2021 年度地下水质量评价统计表

Table 3	Statistics of con	prehensive	evaluation of	of groundwater	quality in 2021
---------	-------------------	------------	---------------	----------------	-----------------

地下北次海凸区	今业众话米刑	统计监测	最高单项指标类别				
地下小页砾万区	百小开灰矢型	点数/个	Ι	П	Ш	IV	V
	岩溶水	74		7	15	35	17
金沙江	孔隙水	31			1	14	16
	裂隙水	26			1	15	10
	岩溶水	1			1		
澜沧江—红河	孔隙水	18		2	2	9	5
	裂隙水	19				9	10
	岩溶水	4				3	1
怒江—伊洛瓦底江	孔隙水	13			2	5	6
	裂隙水	4				2	2
	岩溶水	12			1	5	6
珠江中上游	孔隙水	10			1	7	2
	裂隙水	11				8	3
合计		223		9	24	112	78



图 7 云南省地下水水质监测点分布图

Fig. 7 Distribution of monitoring points of groundwater quality in Yunnan Province

算结果相差 9.358 亿 m³, 与 2000-2020 年栅格分析 结果相差 2.944 亿 m³。

3.2 地下水质

对 2021 年的 223 个水样进行评价, 评价结果统 计如表 3、图 7, 无 Ⅰ 类水; Ⅱ 类水 9 个, 占 4%; Ⅲ类 水 24 个, 占 10.76%; Ⅳ类水 112 个, 占 50.22%; Ⅴ类 水 78 个, 占 34.98%。

根据对Ⅳ、Ⅴ类地下水水质的影响因子分析^[21], 在超标的 190 组数据中,因浑浊度超标的数据有 68 组,肉眼可见物超标的 125 组,pH 超标的 18 组, 挥发性酚类超标的 95 组,铁超标的 3 组,锰超标的 82组,氟化物超标的10组,硫化物超标的28组,耗 氧量超标的28组,氨氮超标的44组,钠超标的6组, 砷超标的18组,硫酸盐超标的9组,碘化物超标的 1组,氯化物超标2组,总硬度超标22组,溶解性总 固体超标6组,硝酸盐38组,硒超标1组,锌超标 1组,铝超标的1组,镉超标的1组。相对应的超标 率分别为浑浊度 35.79%、肉眼可见物 65.79%、PH 值 9.47%、挥发性酚类 50%、铁 1.58%、锰 43.16%、 氟化物 5.26%、硫化物 14.74%、耗氧量 14.74%、氨 氮 23.16%、钠 3.16%、砷 9.47%、硫酸盐 4.74%、碘化 物 0.53%、氯化物 1.05%、总硬度 11.58%、溶解性总 固体 3.16%、硝酸盐 20%、硒 0.53%、锌 0.53%、铝 0.53%、镉 0.53%。结果显示,对水质超标影响率最 大的为肉眼可见物,其次为挥发性酚类、锰,除去感 官指标则影响率最大的为挥发性酚类,其次为锰、氨 氮。地下水超标指标影响率如图 8。

主要污染区分布于经济发达人口密集的城市, 如昆明、曲靖、玉溪、开远、楚雄、大理等地;受污染 的地下水类型多为孔隙水,一般属轻度或中等污染, 少部分地区属重污染,污染物多数为 NH⁺₄、F⁻、Fe、 Mn、挥发性酚类、Hg、COD 等。基岩裂隙水污染程 度轻微,污染因子为 Fe、Mn、Zn、Se、NH⁺₄、F⁻等。

3.2.1 孔隙水污染状况

经济发达地区的孔隙地下水一般遭受不同程度 的污染,地下水受严重污染的主要有昆明、曲靖、开 远、个旧等。浅层孔隙水污染面积约 200 km²,污染



图 8 云南省地下水超标指标影响率统计图

Fig. 8 Statistics of contribution rate of groundwater exceeding permitted levels in Yunnan Province

程度中等偏重的主要位于盆地中部,盆地边缘一般 污染较轻,以生活污染为主。

3.2.2 基岩水(岩溶水和裂隙水)污染状况

昆明地区基岩水由于有较厚的覆盖层,厚数十 米到数百米,其间有一定厚度的相对隔水层,基岩水 基本上未受到污染,仅局部地段受到污染,污染范围 有限,多呈点状或岛状分布,主要出现在浅覆盖岩溶 区。主要的超标项目有 Mn、NH⁴₄、NO²₂、COD、细菌 及大肠菌群。多年的监测表明,基岩水的污染位置 基本固定在的翠湖地段、北郊的黑龙潭、西部的马 街地段。

曲靖地区基岩水污染程度较轻,在盆地边缘地 带为无污染至轻污染,在盆地中部且人口密集区的 曲靖、沾益、三宝地区污染程度较重,主要污染物有 SO₄⁻⁻、F⁻、Cd、Mn、NO₃⁻、NO₂⁻、NH⁺4等。

开远地区污染源主要为化工类企业,其次是生 活污染。主要的超标项目为大肠菌群、细菌总数和 NO₂,各项超标率均较二十年前明显升高,有毒有害 物质的检出率逐年增高,并且含量也在增高。

3.3 可靠性分析

本文以珠江流域水资源量计算为例,采用河川 基流分割法计算并进行计算方法可靠性分析。用流 域地下水枯季径流量法求得的流域枯季地下水资源 量与用河川基流分割法求得的地下水资源量作对比 以验证计算精度,选择了南盘流域的江边街水文站 数据为计算基准。

江边街站流量资料包括了完整的 2020 年 3 月 至 2021 年 7 月的流量数据,满足对一个完整水文年 河川基流量分割对要求。本次验证评价选取了 2020 年 6 月 1 日至 2021 年 5 月 31 日的水文资料作 为评价基础。

经过对江边街站水文资料的基流分割计算,南 盘江 2020-2021年一个完整水文年的基流量为 187070.46万m³,以枯季最低代表性流量(18m³·s⁻¹) 为基准计算基流量下限为 56764.8万m³·a⁻¹。经径流 量法计算得出江边街站以上流域枯季地下水资源量 为 20948.03万m³·a⁻¹,而通过径流量法求出的珠江流 域枯季地下水资源量为 53994.94万m³·a⁻¹。

由表 4 相互验证可知, 径流量法珠江枯季资源 量与南盘江 2020-2021 年基流量下限相当, 表明此 次珠江流域地下水可开采量计算是可靠的; 南盘江 枯季径流量与径流量法珠江枯季资源量的比值表明 江边街站以上流域的径流模数基本可靠, 整个流域 上参数分布较为合理, 南盘江 2020-2021 年基流量 下限与径流量法珠江枯季资源量的比值表明径流模 数取值基本合理, 但仍需实测流量资料修正。

Table 4 Verification of water resource calculation in the Pearl River Basin 项目 水资源量/万m³·a⁻¹ 对A比值 对B比值 对C比值 对D比值 A.珠江流域地下水资源量(基流分割法) 329.55% 893.02% 346.46% 1870704634 1 B.南盘江2020~2021基流量下限 30.34% 270.98% 105.13% 567648000 1

209480324

539949400

表 4 珠江流域水资源计算验证表

11.20%

28.86%

本文按照《地下水资源储量分类分级》(GB15218-
2021),评价地下水资源分级及可靠性,本次评价结
果精度为D级,允许误差50%,可用于地下水资源储
量普查阶段,可作为区域规划的依据和水资源调查
评价与区划工作设计的依据等。

C.南盘江枯季径流量

D.径流量法珠江枯季资源量

4 结论和展望

4.1 结 论

(1)经计算评价, 云南省 2000-2020 年多年平均

地下水资源补给量为 854.66 亿 m³·a⁻¹(其中,长江流 域 181.31 亿 m³·a⁻¹, 西南诸河流域 482.58 亿 m³·a⁻¹, 珠江流域 190.77 亿 m³·a⁻¹),多年平均地下水径流资 源量 629.16 亿 m³·a⁻¹(其中,长江流域 139.42 亿 m³·a⁻¹, 西南诸河流域 341.06 亿 m³·a⁻¹,珠江流域 148.68 亿 m³·a⁻¹)。

1

257.76%

36.90%

95.12%

38.80%

1

(2)通过对云南省 223 组水样的分析,主要污染 区分布于经济发达人口密集的城市,如昆明、曲靖、 玉溪、开远、楚雄、大理等地;受污染的地下水类型 多为孔隙水,污染物主要为 NH⁴、F⁻、Fe、Mn、挥发

4.2 展 望

本文的研究成果对云南省水资源的资源储备、 水安全储备等规划建议、开发具有科学技术支撑作 用。但当前的研究范围、研究深度不足,今后仍进一 步对高原山区地下水系统的"四水"转换和有冰雪融 水参与的河谷型盆地等水文地质单元水平衡等方面 开展研究,为高原湖泊、湿地和林草资源等脆弱生态 系统保护提供支撑。

在新一轮水资源调查评价中,需加强水资源及 环境系统认识,针对流域水循环机制不清等问题, 建立水循环与水平衡调查相关体系,着力解决评价 内容和标准不全、水质水量动态监测预报不足等问 题^[22]。

参考文献

- [1] 王宇,张贵,张华,康晓波,彭淑惠,王波,王劲,周翠琼.云南省 岩溶水文地质环境地质调查与研究[M].北京:质出版社, 2018.
- [2] 张华, 王宇, 张贵. 云南重点岩溶流域水文地质及环境地质调查成果评析[J]. 云南地质, 2014, 33(2): 259-263.
 ZHANG Hua, WANG Yu, ZHANG Gui. An analysis and assessment of hydrogeological and environment geological survey in key karst drainage area in Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2014, 33(2): 259-263.
- [3] 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.

WANG Yu. Evaluation status and problems of groundwater resource potential in Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 137-146.

[4] 卢丽,樊连杰,裴丽欣,邹胜章,林永生,邓日欣,王喆.海南岛 地下水资源状况及其环境地质问题[J].中国地质,2022, 51(2):499-510.

> LU Li, FAN Lianjie, PEI Lixin, ZOU Shengzhang, LIN Yongsheng, DENG Rixin, WANG Zhe. Groundwater resources and environmental geologic problems on Hainan Island[J]. Geology in China, 2022, 51(2): 499-510.

[5] 孙超, 王昕洲, 叶莹莹, 刘琼, 曹颐, 韩冲, 王轶. 河北省地下水 资源承载能力评价及预警方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 55-63.

SUN Chao, WANG Xinzhou, YE Yingying, LIU Qiong, CAO Yi, HAN Chong, WANG Yi. Research on evaluation and early warning of groundwater resources carrying capacity in Hebei Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 55-63.

[6] 康小兵,罗声,许模,刘宏.华蓥山中段地区地下水资源量评价 [J].中国岩溶,2018,37(4):527-534. KANG Xiaobing, LUO Sheng, XU Mo, LIU Hong. Evaluation of groundwater resource loss in middle regions of Huaying mountain[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 527-534.

- [7] 龚建师, 王赫生, 李亮, 周锴锷, 叶永红, 朱春芳, 徐乃政, 陶小虎, 檀梦皎, 束龙仓, 赵贵章. 淮河流域地下水资源概况及开发 潜力[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1052-1061.
 GONG Jianshi, WANG Hesheng, LI Liang, ZHOU Kaie, YE Yonghong, ZHU Chunfang, XU Naizheng, TAO Xiaohu, TAN Mengjiao, SHU Longcang, ZHAO Guizhang. Groundwater resources and development potential in Huaihe river basin[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1052-1061.
- [8] 韩双宝,李甫成,王赛,李海学,袁磊,刘景涛,申豪勇,张学庆,李长青,吴玺,马涛,魏世博,赵敏敏.黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J].中国地质,2021,48(4):1001-1019.
 HAN Shuangbao, LI Fucheng, WANG Sai, LI Haixue, YUAN Lei, LIU Jingtao, SHEN Haoyong, ZHANG Xueqing, LI Changqing, WU Xi, MA Tao, WEI Shibo, ZHAO Minmin. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1001-1019.
- [9] 彭红明,王占巍,罗银飞,袁有靖,王万平.基于地下水数值模 拟的布哈河流域地下水可开采资源量评价[J].现代地质, 2022, 37(4):943-953.

PENG Hongming, WANG Zhanwei, LUO Yinfei, YUAN Youjing, WANG Wanping. Evaluation of exploitable groundwater resources in the Buha river basin based on groundwater numerical simulation[J]. Geoscience, 2022, 37(4): 943-953.

- [10] 吴昊,张兴奇,都金康.基于水足迹理论与 LMDI 模型的贵州 省水资源利用评价[J].中国岩溶, 2019, 38(5): 696-703.
 WU Hao, ZHANG Xingqi, DU Jinkang. Evaluation of water resources utilization in Guizhou Province based on water footprint theory and LMDI model[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 696-703.
- [11] 王宇,彭淑慧.云南省岩溶水赋存特征[J].中国岩溶, 2011, 30(3): 253-259.
 WANG Yu, PENG Shuhui. Distribution features of karst water in Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 253-259.
- [12] 高瑜,张华,杨帆,武贵华,武红梅. 云南省地下水资源评价成 果报告[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2023.
 GAO Yu, ZHANG Hua, YANG Fan, WU Guihua, WU Hongmei. Report on the evaluation results of groundwater resources in Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, 2023.
- [13] 胡萌, 盛英武. 青岛年降水量和水资源量变化特征研究[J]. 水 文, 2022, 42(1): 103-108.
 HU Meng, SHENG Yingwu. Study on variation characteristics of precipitation and water resources in Qingdao[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 103-108.
- [14] 董亚军, 吴扬, 冯菊霞. 西安市黑河灌区水文地质条件及地下水资源量计算方法探讨[J]. 地下水, 2022, 44(5): 65-68.
- [15] 党学亚,张俊,常亮,顾小凡.西北地区水文地质调查与水资源

安全[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 81-94.

DANG Xueya, ZHANG Jun, CHANG Liang, GU Xiaofan. Hydrogeological survey and water resources security in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 81-94.

- [16] 魏良帅,郭蕾蕾,黄安邦,舒勤峰.西南缺水区地下水水量、水质空间分异特征及成因分析:以乌蒙山片区金沙江干流绥江一屏山段为例[J].山地学报,2021,39(5):658-671.
 WEI Liangshuai, GUO Leilei, HUANG Anbang, SHU Qinfeng. Spatial differentiation of groundwater storage, quality and their genesis in water-deficient areas of Southwest China: A case study of the Suijiang-Pingshan section of the Jinshajinag river in the Wumengshan mountain areas, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 658-671.
- [17] 杨杨,赵良杰,潘晓东,夏日元,曹建文.西南岩溶山区地下水 资源评价方法对比研究:以寨底地下河流域为例[J].中国岩 溶,2022,41(5):111-123.

YANG Yang, ZHAO Liangjie, PAN Xiaodong, XIA Riyuan, CAO Jianwen. Comparative study on evaluation methods of groundwater resources in karst area of Southwest China: Taking Zhaidi underground river basin as an example[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 111-123.

- [18] 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(4): 823-830.
 WANG Yu. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 823-830.
- [19] 贾建伟, 王栋, 何康洁, 刘昕. 长江流域地下水资源量分布特征 及开采潜力分析[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 107-112.

JIA Jianwei, WANG Dong, HE Kangjie, LIU Xin. Distribution characteristics and exploitation potentiality of groundwater resources in Changjiang River Basin[J]. Yangtze River, 2021, 52(9): 107-112.

[20] 黄长生,周耘,张胜男,王节涛,刘凤梅,龚冲,易秤云,李龙,周 宏,魏良帅,潘晓东,邵长生,黎义勇,韩文静,尹志彬,李晓哲. 长江流域地下水资源特征与开发利用现状[J].中国地质, 2021,48(4):979-1000.

> HUANG Changsheng, ZHOU Yun, ZHANG Shengnan, WANG Jietao, LIU Fengmei, GONG Chong, YI Chengyun, LI Long, ZHOU Hong, WEI Liangshuai, PAN Xiaodong, SHAO Changsheng, LI Yiyong, HAN Wenjing, YIN Zhibin, LI Xiaozhe. Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 979-1000.

[21] 高瑜,张华,康晓莉,周俊蓉,武红梅,刘海峰,叶咸. 云南省主要盆地地下水水质监测与变化趋势分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 542-552.
 GAO Yu, ZHANG Hua, KANG Xiaoli, ZHOU Junrong, WU

Hongmei, LIU Haifeng, YE Xian. Trend analysis of groundwater quality in major basins of Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(4): 542-552.

[22] 赵良杰,杨杨,曹建文,夏日元,王喆,栾崧,林玉山.珠江流域 地下水资源评价及问题分析[J].中国地质,2021,48(4):1020-1031.

> ZHAO Liangjie, YANG Yang, CAO Jianwen, XIA Riyuan, WANG Zhe, LUAN Song, LIN Yushan. Groundwater resources evaluation and problem analysis in Pearl River Basin[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1020-1031.

Analysis of a new round of groundwater resource evaluation in Yunnan Province

GAO Yu^{1,2,3}, ZHANG Hua^{1,2,3}, WU Guihua^{1,2,3}, YANG Fan^{1,2,3}, KANG Xiaoli^{1,2,3}, ZHOU Junrong^{1,2,3}, WU Hongmei^{1,2,3}, LIU Haifeng^{1,2,3}

650216, China; 3. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract Yunnan Province is located in the eastern region of the Qinghai-Tibet Plateau and the western area of the Yunnan-Guizhou Plateau. This province is characterized by mountainous plateau topography and is abundant in water resources. Groundwater resources hold great potential for development and utilization, but there is a critical issue regarding their uneven spatial distribution. Therefore, it is imperative to accurately investigate and evaluate the groundwater resources in Yunnan Province. Based on the systematic study of hydrogeological conditions in this province, its groundwater system is divided into 21 four-level basin systems and 41 five-level units for groundwater resource evaluation. In this paper, we systematically discuss the evaluation method and parameter determination for groundwater resources, and summarize and present the final evaluation results.

In this evaluation, we utilized long-term rainfall data spanning from 2000 to 2020, along with the permeability coefficient and runoff modulus obtained from 1 : 50,000 hydrogeological surveys conducted in Zhaotong, Yuanmou, Binchuan, Qujing, Yuxi, and other basins since 1960. Additionally, we incorporated data from the 1 : 50,000

Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China;
 Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan
 Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan
 Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan

hydrogeological surveys of key karst areas in Yunnan, as well as the 1: 50,000 hydrogeological survey report of this province. We used the monitoring data from meteorological and hydrological stations to adjust the parameters of each evaluation zone in order to assess the groundwater resources in Yunnan Province. It is concluded that the average annual recharge of groundwater resources from 2000 to 2020 was 85.466 billion $m^3 a^{-1}$. The average annual groundwater runoff resources was 62.916 billion $m^3 \cdot a^{-1}$, accounting for 73.62% of the groundwater resource supply. Among them, the average annual groundwater resource supply in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 was 18.131 billion m³·a⁻¹, while the average annual groundwater runoff resources during the same period was 13.942 billion $m^3 \cdot a^{-1}$. In contrast, the average annual groundwater resource supply in the river basins of Southwest China from 2000 to 2020 was 48.258 billion $m^3 \cdot a^{-1}$, with average annual groundwater runoff resources amounting to 34.106 billion m³·a⁻¹. Besides, the average annual recharge of groundwater resources in the Pearl River Basin from 2000 to 2020 was 190.77 billion $m^3 a^{-1}$, and the average annual groundwater runoff resources was 148.68 billion $m^3 a^{-1}$. In the past 21 years, the groundwater resource supply in the Yangtze River Basin, the river basins of Southwest China, and the Pearl River Basin exhibited significant fluctuations, with the lowest supply occurring in 2011. The highest groundwater resource supply in the Yangtze River Basin was recorded in 2016. The Pearl River Basin experienced its peak supply in 2015, and the river basins of Southwest China had the highest supply in 2008. The data presented not only highlights the disparities in groundwater resources across various basins in Yunnan Province, but also serves as a crucial foundation for regional water resource management and planning. In terms of groundwater quality, the results from 223 water quality monitoring points in 2021 indicate that there were no Class I water samples detected; Class II water was found at 9 points, accounting for 4% of the total; Class III water was detected at 24 points, accounting for 10.76%; Class IV water was identified at 112 points, making up 50.22%; and Class V water was present at 78 points, which accounted for 34.98%. The types of contaminated groundwater primarily included pore water, which typically exhibited mild to moderate levels of pollution. In contrast, only a few areas were heavily polluted. Additionally, bedrock fissure water was present, but its degree of pollution was generally slight. Most of the pollutants were NH₄⁺, F, Fe, Mn, volatile phenols, Hg, COD, etc. The analysis of the factors influencing the quality of Class IV and Class V groundwater indicated that the most significant contributor to water quality exceeding permitted levels was the visible matter, followed by volatile phenols and manganese. In addition to the sensory index, the most influential factor was volatile phenols, followed by manganese and ammonia nitrogen. The main areas of pollution were concentrated in economically developed and densely populated cities, such as Kunming, Qujing, Yuxi, Kaiyuan, Chuxiong, Dali, and other places.

In summary, although the groundwater resources in Yunnan Province are abundant, the water quality problem cannot be ignored. In the future, the protection and management of groundwater resources should be strengthened, especially in the areas with rapid economic development. The sustainable utilization of groundwater resources should be ensured by implementing stricter environmental protection policies, strengthening the monitoring and control of pollution sources, promoting water-saving technologies, and raising public awareness of environmental protection.

Key words groundwater resources, evaluation method, calculation parameter, hydroecology, the Yunnan plateau

(编辑张玲)