

王波, 赵莉, 陈晓梅, 等. 洱海流域天然出露矿泉水资源特征及远景评价[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1275-1286.

DOI: 10.11932/karst20240605

洱海流域天然出露矿泉水资源特征及远景评价

王波^{1,2,3}, 赵莉^{1,2,3}, 陈晓梅^{1,2,3}, 朱广毅^{1,2,3}, 张高引^{1,2,3}

(1. 云南省地质环境监测院, 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)

摘要: 为合理规划洱海流域矿泉水资源开发, 避免过度开采, 保障其可持续利用, 需要深入研究洱海流域矿泉水资源特征及成因。文章依托地质调查项目, 对矿泉水资源的水化学特征、分布情况及形成条件进行分析, 通过系统归纳、类比分析、勘查实例举证等得知, 流域矿泉水类型为偏硅酸饮用矿泉水、微量元素饮用矿泉水及理疗矿泉水, 主要分布于流域西部断裂褶皱发育、地层岩性变化频繁及岩浆岩广布区域。矿泉水偏硅酸含量普遍较高, 按形成条件主控因素可分为断裂带对流型和潜流溶滤型2种成因类型, 前者多为优质理疗矿泉水, 后者主要为偏硅酸饮用矿泉水。流域矿泉水资源丰富, 现状开采利用率低, 开采潜力大。文章对流域矿泉水资源特征进行分析并开展远景评价, 科学制定保护和开发策略, 研究成果可为维持流域生态平衡、维护生物多样性、促进区域经济与环境协调发展提供依据。

关键词: 洱海流域; 矿泉水资源; 地下水; 地质构造; 开采潜力

创新点: 依托详实的调查资料, 运用多手段综合分析, 突破矿泉水资源单点或特定类型研究局限, 从资源特征及分析评价方向开展矿泉水资源区域性研究, 为矿泉水资源保护开发及应用提供参考。

中图分类号: P641.5 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1275-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

洱海流域, 作为我国西南地区生态环境优美且具有重要文化与经济价值的区域, 深入研究区内矿泉水资源特征, 全面开展远景评价, 可保障居民健康饮水、提升民众生活品质; 推动产业发展, 促进就业和经济发展; 保护水资源生态平衡, 维护生物多样性。该研究对深入了解地质演化历史和水循环过程, 科学合理保护和可持续利用矿泉水资源等都具有深远意义。

我国对矿泉水资源的研究较多, 宋德人^[1]对我国饮用天然矿泉水的形成条件和分布规律初步研究指出, 地质构造条件对矿泉水的形成和分布起控制作用。Monique van der Aa^[2]认为不同类型的矿泉水是不同地球化学作用形成的。苏春利等^[3]认为构造作用和变质作用对矿泉水的形成起主导作用。赵帅军等^[4]认为地形地貌是控制矿泉水形成与出露的主要因素。牛俊强、金文正等^[5-6]认为矿泉水主要受地质构造条件、地球化学条件及地下水水动力条件等因素控制。云南省于20世纪80年代提交了《云南省

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目: 滇西北地区生态地质调查(编号: DD2019); 2023年度部省合作试点项目: 高原山区露天矿山生态修复成效评估技术方法研究(自然资源科技函[2024]182号)

第一作者简介: 王波(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质研究。E-mail: 393195356@qq.com。

通信作者: 赵莉(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究。E-mail: 1064044366@qq.com。

收稿日期: 2024-02-10

东部地区矿泉水调查报告》和《云南省滇西地区矿泉水调查报告》，初步查明了全省矿泉水形成的地质环境条件及分布特征等，为云南矿泉水资源研究奠定了基础，后期单婷婷、迟帅、翟文秀、张贵等分别对昆明西山偏硅酸矿泉水形成机理^[7]、云南松茂区矿泉水成因^[8]、云南省天然矿泉水资源开发利用现状及建议^[9]、滇东岩溶高原矿泉水类型及地质控制等方面进行了研究^[10]。总体上，矿泉水资源从分布及类型初判探索到形成机制、化学特性等方面的研究^[11-12]，多集中于单个点或特定类型矿泉水上，区域性研究相对较少。

本文依托滇西北洱海流域典型湿地水文地质要素调查项目，在资料收集、野外调查、地质测绘、取样测试等基础上，从地貌、地层岩性、构造、气候、水质等多方归纳总结、梳理统计、综合分析，通过对矿泉水资源特征分析研究，明确其水质、水量、分布规律等，为制定科学的保护和开发策略提供依据。通过远景评价，预测矿泉水资源开发潜力和可持续利用前景，为洱海流域生态环境保护、水资源持续利用、经济发展及社会稳定提供有力支持^[13]，也为类似的地区矿泉水资源研究和管理提供参考和借鉴。

1 流域概况

1.1 地理位置与范围

洱海流域位于滇西中部，澜沧江一级支流漾濞江上游。流域东西部以地表分水岭为界，北部为牛街盆地北部汇水边界，南部至波罗江南端汇水边界，东西宽约 50 km，南北长约 60 km，面积约 2 565 km²。行政区划主要涉及大理、洱源 2 县(市)，其中大理市包括下关、凤仪、海东、双廊、上关等 11 个镇(区)，洱源县包括邓川、右所、茈碧湖等 6 个乡镇，详见图 1。

1.2 地质地貌特征

1.2.1 地形地貌

洱海流域地处横断山东南缘，澜沧江、金沙江和红河三大水系分水岭地带。地势北西高南东低，最高点是点苍山的马龙峰顶，海拔 4 122 m，最低点为南西部西洱河附近，海拔约 1 600 m。流域内中部为盆地，东部、西部为山区，地貌依据成因与形态特征可



图 1 洱海流域地理位置及行政区划

Fig. 1 Geographic location and administrative divisions of the Erhai lake basin

分为：堆积地貌、构造剥蚀地貌、构造溶蚀地貌及冰蚀侵蚀构造地貌。堆积地貌位于中部第四系冲洪积、冲湖积层分布区；构造剥蚀地貌为南部、北西部低中山区；构造溶蚀地貌为东部和北东部中高山区；冰蚀侵蚀构造地貌主要分布于西部海拔 3 600 m 以上的苍山主山脊线两侧(图 2)^[14]。

1.2.2 地质构造

流域处于华南板块，康藏歹字形构造褶皱带东部边沿，地层分区为康滇古陆。地层从元古界至新生界均有分布，岩浆岩以零星出露的喜山期石英正长斑岩脉和花岗斑岩脉为主。流域地质构造复杂，主要发育 NNW 向断裂，褶皱多表现为走向 NW 的不对称线状背斜及向斜。

流域控水构造特征显著，断裂和褶皱复合部位，往往是矿泉水富集和出露主要地段。区域大断裂红河—洱海断裂，为地下水运移提供通道的同时，还影响着水岩物质交换及出露位置；苍山复式背斜、洱海

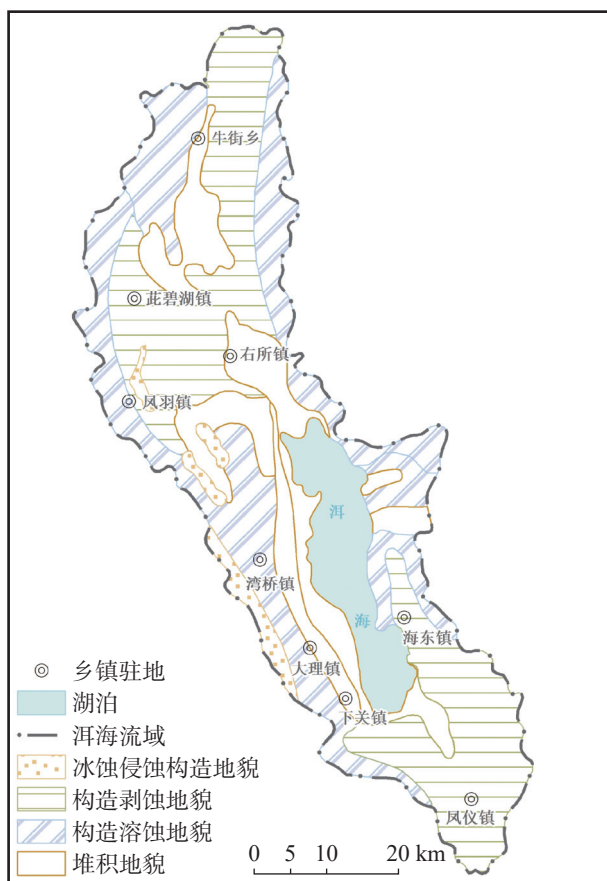


图2 洱海流域地貌类型分布

Fig. 2 Distribution of landforms in the Erhai lake basin

复式向斜等褶皱, 则通过控制地层起伏和地下水储存空间, 影响着矿泉水的富集与径流; 流域东部和北东部碳酸岩是矿泉水主要出露的主要地层, 其岩溶作用强烈, 造就了多种水质特征的矿泉水资源。南部、北西部岩浆岩区, 岩石矿物成分丰富, 是矿泉水资源形成的有利地段。西部元古界变质岩区, 地下水在径流中与岩石物质交换, 具备矿化度, 从而形成矿泉水资源。不同地层岩性所含矿物质不同, 碳酸岩富含 Ca、Mg、Sr、Zn 等, 岩浆岩富含 Si、Fe 等, 变质岩矿物成分较复杂, 流域内主要含 Si、B 等。

1.3 气候水文

流域属北亚热带高原季风气候类, 具有寒暑适中, 气候温和, 垂直分带明显。年平均气温 14.9℃, 年平均降雨量 1049.3 mm, 5~10 月为雨季, 11 月至翌年 4 月为干季, 年平均蒸发量为 1904.5 mm, 3~5 月蒸发量最大, 11 月蒸发量最小。

流域水系总体呈 SSE—NNW 向展布, 区内共有大小溪流 117 条, 除西洱河外, 全部发源于大理盆地四周山区并流入洱海。汇入洱海的河流, 包括苍山

十八溪、弥苴河、波罗江、玉龙河、凤尾箐和海潮河 25 条主要河流。苍山十八溪是发育于苍山东坡流域面积较大、流程较长的溪流, 年均径流量约 2.77 亿 m^3 , 是洱海重要的补给水源^[15]。洱海为盆地汇水范围内地表水、地下水排泄带和汇集地, 是云南第二大高原淡水湖泊, 其南北长 42.53 km, 最大湖宽 9.19 km, 最窄 2.55 km, 平均水深 11.52 m, 蓄水量 28.8 亿 m^3 。

2 矿泉水资源特征

2019 年依托滇西北地区生态地质调查项目, 洱海流域实施完成了 1:5 万典型湿地水文地质要素调查项目。在实施项目充分调查, 以及 280 组取样分析的基础上, 对流域内 26 个具有代表性的天然出露水点又进行了矿泉水样取样分析, 依据《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(GB8537-2018)、《天然矿泉水资源地质勘查规范》(GB/T13727-2016), 满足矿泉水标准的 12 处, 其中符合饮用矿泉水标准 9 处, 符合医疗矿泉水标准的 3 处(图 3)。

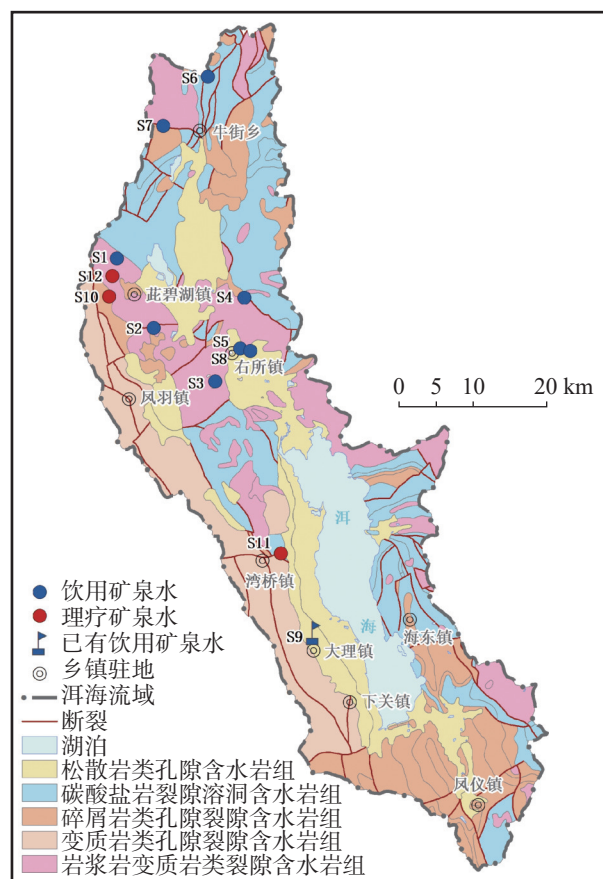


图3 洱海流域矿泉水资源分布

Fig. 3 Distribution of mineral water resources in the Erhai lake basin

2.1 分布特征

洱海流域矿泉水资源分布呈现出一定规律。空间位置上,主要呈条带状分布于流域西部,具有北西多、南东少,山区多、盆地少的特点,具体主要集中于流域北西部、北部低中山山麓及山麓向盆地过渡地段,海拔 1900~2300 m 之间的沟谷区域或盆地边缘。且多出露于断裂褶皱发育、地层岩性变化频繁、岩浆岩广布区域;含水层主要为碳酸岩、岩浆岩及变质岩地层。碳酸岩地层是矿泉水资源主要含水层,其分布广、规模大,厚度可达数百米,且呈层状连续分布,含水层一般埋藏较浅,在 30~50 m 之间,是当地矿泉水的主要开采层位。岩浆岩地层是重要含水层,多呈岩株、岩脉状侵入其他地层,规模相对较小,含水层埋藏深度变化较大,一般较碳酸岩含水层深,且分布不连续,呈孤立的块状或带状分布于其他地层之中。变质岩地层在矿泉水资源含水层中所占比例较小,多呈片状、带状分布,厚度不均,一般在几十米至数百米之间。含水层埋藏深度较深,多在山区或地势较高的区域出露,在平坝区则埋藏较深,一般在数百米以下,且由于其分布的不连续性和复杂性,开采难度相对较大。

2.2 矿泉水分类特征

2.2.1 物理化学基本特征

12 个符合矿泉水标准的水点,选取色、嗅和味、浑浊度、pH、总硬度、TDS(溶解性总固体)、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、游离 CO_2 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 NH_4^+ 、 F^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、可溶性 SiO_2 、COD(耗氧量)24 项指标进行测试分析后,按《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)进行水质综合评价,结果显示矿泉水水质优良,均不超过Ⅲ类。

水体均为无色、无味、无臭、透明、无肉眼可见物,色度 <5 ,浑浊度 <3 。水中阴离子以 HCO_3^- 为主,含量为 98.28~242.8 $mg \cdot L^{-1}$,浓度百分比为 64%~97%。阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 为主: Ca^{2+} 含量为 25.81~54.60 $mg \cdot L^{-1}$,浓度百分比为 53%~64%。 Na^+ 含量为 0.66~14.93 $mg \cdot L^{-1}$,浓度百分比为 2%~21%。 Mg^{2+} 含量为 7.23~27.53 $mg \cdot L^{-1}$,浓度百分比为 19%~38%,水化学类型为 $HCO_3^-Ca \cdot Na$ 、 $HCO_3^-Ca \cdot Mg$ 型。水体 pH 为 6.5~8.0,为中性水,总硬度 94.21~245.5 $mg \cdot L^{-1}$,属软水~微硬水。TDS 为 119.54~355.83 $mg \cdot L^{-1}$,为淡

水,具低矿化度特点。

2.2.2 矿泉水类型及水质特征

依据《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(GB8537-2018)、《天然矿泉水资源地质勘查规范》(GB/T13727-2016)、《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615-2010),以特殊的化学成分及温度为标准,我省矿泉水主要划分为偏硅酸矿泉水、盐类矿泉水(TDS 大于 1000 $mg \cdot L^{-1}$)、微量元素矿泉水(指 Sr、Li、Zn、Se、Rn、 H_2S ,有其中之一达标)、碳酸矿泉水、复合型矿泉水、温矿水(水温 $\geq 36^\circ C$,有医疗作用)6 类^[16]。其中,温矿水为理疗矿泉水,其余 5 类为饮用矿泉水。

根据饮用矿泉水及理疗矿泉水特征指标,选取色度、浑浊度等 5 项感官指标, Li、Sr、Zn、Ra 放射性等 24 项理化指标,挥发酚、氢化物、 NO_2^- 等 6 项污染指标,共 35 项饮用矿泉水指标,以及 CO_2 、 HBO_2 、 H_2SiO_3 、温度、矿化度等 14 项医疗矿泉水指标进行测试分析,按照上述矿泉水划分类型,本次符合饮用矿泉水标准 8 处,符合理疗矿泉水标准的 3 处。

(1) 饮用矿泉水类型及特征

包括偏硅酸矿泉水和微量元素矿泉水两类:①偏硅酸矿泉水 S_3 、 S_5 及 S_8 三处,水温差异较大,分别为 $19^\circ C$ 、 $16^\circ C$ 、 $23^\circ C$, H_2SiO_3 含量分别为 37.28 $mg \cdot L^{-1}$ 、30.11 $mg \cdot L^{-1}$ 、33.25 $mg \cdot L^{-1}$, H_2SiO_3 含量与水温有一定的相关性,随温度升高偏硅酸含量增高,水化学类型主要为 $HCO_3^-Ca \cdot Na$ 型, pH 值分别为 7.2、7.2、6.5, TDS 分别为 119.54 $mg \cdot L^{-1}$ 、165.12 $mg \cdot L^{-1}$ 、338.89 $mg \cdot L^{-1}$;②微量元素矿泉水 S_1 、 S_2 、 S_4 、 S_6 及 S_7 共 5 处,包括基岩裂隙水 1 处,岩溶水 4 处,其中 Sr 达标为 S_2 、 S_4 、 S_6 三处,含量分别 0.32 $mg \cdot L^{-1}$ 、0.22 $mg \cdot L^{-1}$ 、0.21 $mg \cdot L^{-1}$, Zn 达标为 S_1 及 S_7 两处,含量分别为 0.26 $mg \cdot L^{-1}$ 、0.25 $mg \cdot L^{-1}$ 。微量元素矿泉水常有 1~3 个较高含量的伴生微量元素,并含有较高的 H_2SiO_3 ,水温 $14 \sim 18^\circ C$, TDS 为 137.85~381.54 $mg \cdot L^{-1}$, pH=7.2~8.0,水化学类型以 $HCO_3^-Ca \cdot Mg$ 型为主(表 1)。

(2) 理疗矿泉水类型及特征

根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615-2010),理疗矿泉水水质标准所规定的各项指标评价与命名。本次符合理疗矿泉水标准的分别为茈碧湖镇石照壁村温泉(S_{10})、湾桥镇下崇村温泉(S_{11})和茈碧湖镇伙山村温泉(S_{12})3 处。均为温泉,一定程度上

表 1 洱海流域饮用矿泉水水质特征

Table 1 Water quality characteristics of drinking mineral water in the Erhai lake basin

点号	位置	流量 /L·s ⁻¹	地下水 类型	pH	溶解性总 固体/mg·L ⁻¹	达标项	
						微量元素指标	含量/mg·L ⁻¹
S ₁	洱源县茈碧湖镇北排村北西300 m	24.76	岩溶下降泉	7.9	137.85	Zn	0.26
S ₂	洱源县茈碧湖镇大南村南东1050 m	17.50	裂隙下降泉	7.3	234.33	Sr	0.32
S ₃	洱源县右所镇甘家村南50 m	1.87	裂隙下降泉	7.2	119.54	H ₂ SiO ₃	37.28
S ₄	洱源县右所镇赶羊涧村北800 m	12.10	岩溶上升泉	7.3	170.22	Sr	0.22
S ₅	洱源县右所镇太平村南西50 m	1.51	裂隙下降泉	7.2	165.12	H ₂ SiO ₃	30.11
S ₆	洱源县牛街镇西村西北974 m	0.58	岩溶下降泉	8.0	381.54	Sr	0.21
S ₇	洱源县牛街镇天官坟村东南775 m	15.87	岩溶下降泉	7.9	155.05	Zn	0.25
S ₈	洱源县右所镇秦家营村南侧	1.20	裂隙上升泉	6.5	355.83	H ₂ SiO ₃	33.25
S ₉	大理市大理古城西200 m	1.85	裂隙下降泉	7.5	73.47	H ₂ SiO ₃	28.10

注: S₉为流域内已开发“大理矿泉”品牌矿泉水。
Note: S9 is the brand mineral water of "Dali Mineral Spring" that has been developed in the basin.

代表了流域三营—牛街、下山口及右所西湖 3 处地
热区^[17]水质状况。泉水 TDS 分别为 192.14 mg·L⁻¹、
185.17 mg·L⁻¹、358.73 mg·L⁻¹, pH 值分布为 7.8、7.3、
8.0, 水化学类型主要为 HCO₃-Ca·Na 型。水温、氟、
偏硅酸含量均较高, 达医疗价值浓度和矿水命名浓
度指标均在 3 项及以上(表 2)。

表 2 洱海流域医疗矿泉水水质特征

Table 2 Water quality characteristics of therapeutic mineral water in the Erhai lake basin

序号	位置	流量/L·s ⁻¹	地下水类型	水温/℃	达标指标	测试浓度	有医疗价值浓度	命名矿水浓度	矿水名称
						mg·L ⁻¹			
S ₁₀	洱源县茈碧湖镇石照壁村北西500 m	15.20	裂隙上升泉	42	F	2.20	1	2	氟水、硅水、温水
					H ₂ SiO ₃	85.31	25	50	
					HBO ₂	3.89	1.2	50	
S ₁₁	大理市湾桥镇下崇村南唐僧寺内	7.20	裂隙上升泉	87	H ₂ SiO ₃	192.38	25	50	氟水、硅水、温水
					F	9.00	1	2	
					Li	2.21	1	5	
S ₁₂	洱源县茈碧湖镇伙山村北东100 m	4.02	裂隙上升泉	45	F	4.20	1	2	氟水、硅水、温水
					H ₂ SiO ₃	70.15	25	50	

注: 水温≥34℃达医疗价值浓度, 且可命名为温水。
Note: When water temperature ≥ 34℃, it reaches therapeutic value concentration, and can be named warm water.

2.2.3 矿泉水流量及动态

洱海流域不同含水层的矿泉水资源流量存在差
异, 根据本次雨季(8月)测流, 碳酸岩含水层, 由于其
分布广泛且岩溶发育, 矿泉水流量相对较大, 为
0.58~24.76 L·s⁻¹; 岩浆岩含水层因规模相对较小且分
布不连续, 其矿泉水流量普遍较小, 流量在 1.20~
17.50 L·s⁻¹之间; 变质岩含水层的流量同样较小, 且
变幅较大, 流量最小 1.85 L·s⁻¹, 而在构造破碎带附近,
流量又有所增加, 为 7.20 L·s⁻¹, 但总体规模有限。
流域矿泉水资源流量动态随季节变化明显。雨
季时, 大气降水入渗补给增加, 矿泉水流量普遍上升。

以碳酸岩地层为例, 雨季期间, 降水通过岩溶裂隙等
通道快速下渗, 补充含水层的水量, 泉水流量可增加
30%~50%, 而在旱季, 降水减少, 入渗补给不足, 矿泉
水流量逐渐减小, 部分泉水流量甚至降至雨季流量
的 50% 以下。如洱源县茈碧湖镇北排村北西的岩溶
下降泉(S₁), 雨季流量 24.76 L·s⁻¹, 枯季则降至 8~
10 L·s⁻¹。此外, 长期气候变化对矿泉水资源动态也
有深远影响。随着全球气候变暖, 流域降水模式发
生改变, 降水总量和分布的不确定性增加, 矿泉水资
源补给量和流量稳定性受到威胁。同时, 人类活动
如过度开采地下水、工程建设等, 也会干扰矿泉水资

源的动态平衡,进一步影响其流量和水质状况。

3 矿泉水资源成因分析

3.1 地质构造因素

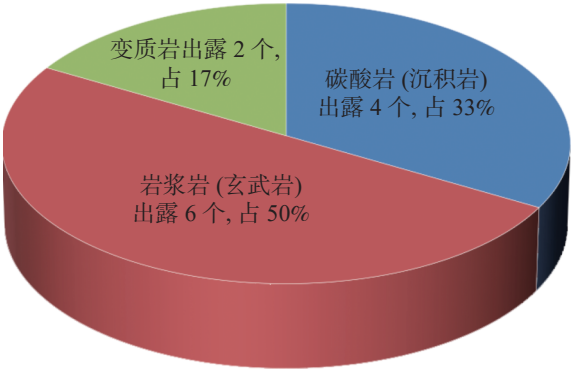
3.1.1 矿泉水与地层岩性关系

矿泉水出露与地层岩性密切相关,流域地层岩

性多样,矿泉水主要赋存 4 个不同时代的地层中。其中,元古界苍山群($Pt_1C^{.2}$)变质岩出露 2 个;古生界泥盆系下统(D_1)碳酸岩出露 2 个;古生界石炭系上统(C_3)碳酸岩出露 1 个;古生界二叠系(Pe)玄武岩出露 3 个;中生界三叠系中统北衙组(T_2b^1)碳酸岩出露 1 个;喜山期(TE)碱性玄武岩出露 3 个。矿泉水由多到少出露的地层岩性依次为玄武岩、碳酸岩、变质岩,详见表 3。

表 3 洱海流域天然矿泉水点出露地层岩性
Table 3 Lithology of outcrops at natural mineral water points in the Erhai lake basin

点号	地层代号	出露岩性
S ₁	D ₁ q	中厚层—块状灰岩、石灰岩
S ₂	TE.	碱性玄武岩
S ₃	Pe	玄武岩
S ₄	T ₂ b ¹	泥质灰岩夹粉砂岩、页岩
S ₅	Pe	玄武岩
S ₆	C ₃	灰岩,鲕状灰岩
S ₇	D ₁ k	块状白云质灰岩、白云岩
S ₈	Pe	玄武岩
S ₉	Pt ₁ C. ²	片岩夹大理岩、结晶灰岩
S ₁₀	TE.	玄武岩
S ₁₁	Pt ₁ C. ²	大理岩、变质白云岩、结晶灰岩、片岩
S ₁₂	TE.	碱性玄武岩



地下水化学组分主要取决于围岩性质与地下水的循环交替条件,是水与周围介质长期相互作用形成的^[18]。流域偏硅酸矿泉水,均赋存于二叠系(Pe)玄武岩地层中;微量元素矿泉水,与碳酸岩地层密切相关,除 1 个赋存于喜山期(TE)碱性玄武岩中,其余 3 个均赋存于泥盆系下统(D_1)、石炭系上统(C_3)和三叠系中统北衙组(T_2b^1)碳酸岩中;温矿水,2 个赋存于喜山期(TE)碱性玄武岩,1 个赋存于苍山群($Pt_1C^{.2}$)变质岩中。岩浆岩地层中矿泉水通常含有较高的硅、铁等元素^[19];碳酸盐岩的可溶性,使地下水在流经碳酸盐岩地层时,溶解了大量的矿物质,形成了富含镁、锶、锌等元素的矿泉水^[20]。变质岩矿物成分复杂,地下水在与变质岩相互作用过程中,溶解了其中的矿物质,形成了具有特殊品质的矿泉水。

3.1.2 矿泉水与断裂构造的关系

流域断裂构造对矿泉水的形成与分布有着明显的控制作用^[21]。红河—洱海断裂是区内最主要的控

制性深大断裂,长度大于 500 km,走向 NW,倾向 40°,倾角平均约 55°,破碎带宽十至数十米,为压扭性断裂,在洱海东西两岸均发育近 SN 向线性构造带,是洱海和大理盆地的边界构造。由于大断裂影响,次级断裂亦极为发育,走向与主断裂方向一致,而近东向断裂多切错 NW 向、SN 向断裂。受断裂控制、地形影响,地下水整体呈条带状 SN 向出露,多数矿泉水就分布在断裂带或断裂交汇部位。断裂破碎带增大了地下水与岩石接触面,促进了水岩相互作用,使得地下水中矿物质含量经长时间富集达到了饮用矿泉水标准,同时,当断裂切穿深部储热层时,地下热水又沿破碎带运移而形成温泉,部分达到医疗矿泉水标准^[9]。据统计,流域内矿泉水直接因断裂形成的有 S₂、S₄、S₆、S₇ 和 S₁₁ 5 个,占总数的 42%,和断裂密切相关,受断层控制的岩浆岩活动形成的有 S₈、S₁₀ 及 S₁₂ 三个,占总数的 33%。

3.2 地形地貌因素

洱海流域中部盆地区,地形平坦开阔,海拔

1966~2000 m, 西部高山、高中山区, 海拔多在 3000~4000 m, 地形切割强烈。北部和东部中山、低中山区, 海拔多在 2400~2700 m。不同区域坡度差异明显, 坡度较缓区域主要分布于洱海海南、海西与海北的坝区, 海西苍山山脊、海北、海东与海南远山地形坡度较大。

地形地貌主要通过控制地下水循环深度和出露条件, 而对矿泉水的形成产生明显影响^[22-23]。流域中部, 三营—洱源盆地南至右所盆地北东中山缓坡区, 地形起伏相对较缓, 切割深度较小。地下水在山区接受降水补给后向盆地径流, 径流循环时间较长, 水岩相互作用较充分, 径流过程中于盆地边缘或有利地段, 受地形切割或断层阻隔而出露, 因此, 该区易形成矿泉水, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_8 、 S_{10} 和 S_{12} 均出露于该区域, 占总数的 67%; 流域西部、北部高中山区, 地形切割强烈, 山高坡陡。地下水接受降水补给后, 快速循环径流^[24], 水岩作用时间短, 一般不易形成矿泉水, 但受红河—洱海区域大断裂影响, 区内断裂褶皱极为发育, 变质岩、岩浆岩、碳酸岩等地层岩性复杂, 从而为矿泉水的形成创造了有利条件。 S_6 、 S_7 、 S_9 和 S_{11} 出露于该区域, 占总数的 33%; 流域东部中山、低中山区, 沟谷发育, 地形陡峭, 地下水循环径流速度较快, 水岩相互作用时间短, 不易形成矿泉水, 区内无矿泉水出露; 流域中部大理盆地, 地形平坦开阔, 地下水补给条件较差, 径流滞缓, 无矿泉水点出露。

3.3 气候因素

洱海流域属高原季风气候, 垂直分带明显, 流域降水丰富, 年平均降雨量 1049.3 mm, 5~10 月为雨季,

11 月—翌年 4 月为旱季。降水量由南向北、由西向东递减, 西面降水比东面高, 西面高山地带降水量最大^[8]。

流域降水及气候条件通过改变水源补给、水动力条件等, 对矿泉水的形成产生影响。长期丰富的降水补给, 使得流域地下水位得以维持并稳定径流, 为矿泉水的形成提供了物质基础, 西部较东部降水充沛的空间差异, 一定程度上也体现了矿泉水西部出露多, 东部出露少的特点; 降雨季节性差异一定程度上促进了矿泉水的形成。雨季降水多而集中, 快速下渗、径流, 浅层含水层对深层含水层进行水量补充, 旱季降水减少, 深层含水层又反哺浅层含水层, 保证了矿泉水水源补给^[25]。同时, 在此循环交替过程中, 一方面有效更新过滤地下水体, 保证优良水质; 另一方面增加了水岩相互作用, 使地下水不断溶解吸收岩石矿物成分, 促进矿泉水资源的形成; 此外, 流域内独特的高原季风气候, 促进了岩石风化和水岩作用, 有助于矿泉水的形成与演化。

3.4 矿泉水成因模式

流域内复杂的地质构造、地形地貌、含水层埋藏分布和地下水径流循环特征等, 致使矿泉水形成条件各异, 成因类型也不尽相同。根据形成条件主控因素差异, 流域内矿泉水成因类型可划分为断裂带对流型和潜流溶滤型 2 类^[5](图 4)。

3.4.1 断裂带对流型

该类矿泉水出露于断层破碎带上, 与深大断裂、地下热源密切相关, 断裂或其破碎带是矿泉水贮存

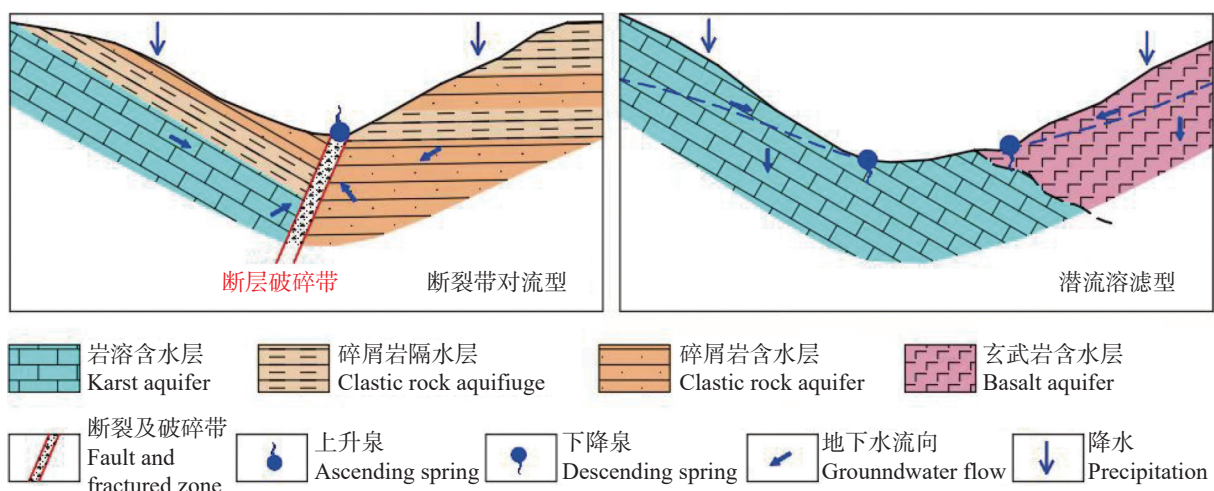


图 4 矿泉水成因模式图

Fig. 4 Diagram of mineral water genesis

空间和主要运移通道。如洱源县茈碧湖地热田温泉,位于洱源—三营盆地南部,红河—洱海大断裂北端延伸纵贯区内,地热田分为上部孔隙型层状热储和下部裂隙型带状热储。上部为第四系(Q_4)冲湖积沉积物,厚度 70 至 200 余 m,据钻孔资料,主要含水段在孔深 76.6 m 以上,顶板埋深 22.8 m。下部裂隙型带状热储为志留系青山组(S_3q)灰岩,受断裂构造控制,破碎,其透水性和富水性较强,赋存热水,现有热供水井揭露热储厚度大于 256.38 m。热田接受降水补给渗入地下,沿断裂或裂隙下渗,并吸收围岩热量,在水力压差作用下进行深循环,在沿断裂上升中充于其他断裂夹持的断裂破碎带中而形成带状热储,在构造和地层的有利部位,热水上升至第四系砂砾石层中与冷水混合后形成孔隙型层状热储。

据资料显示,热田内现有热水井 10 余口,天然出露温泉 1 处(文庙温泉已干涸)。水温 40~75 °C, pH7.1~9.1, F 含量 5.6~9.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_2SiO_3 为 65.98~118.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HBO_2 为 1.026~2.175 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主,可作为优质理疗矿泉水,已开发为大理地热国、九气台温泉宾馆等多处休闲旅游服务区。

流域内 S_2 、 S_4 、 S_6 、 S_7 和 S_{11} 均属该成因类型。矿泉水在断裂周边接受降水补给后,受水位、水温压力差控制,与断裂深部循环勾通,经过溶滤,与不同围岩发生作用,后沿断裂或其破碎带上升,于有利位置出露呈泉,多形成理疗矿泉水,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主。具有循环较深、有承压性、水温较高、动态较稳定等特点。由于循环深度不同,水温和水化学类型随环境的变化差异较大。

3.4.2 潜流溶滤型

该类矿泉水最为普遍,数量多分布广,分布于各个时代碳酸盐岩、碎屑岩、岩浆岩及变质岩等,以岩溶裂隙、层状裂隙、风化裂隙和孔隙为矿水储集空间。主要出露于地势较低的沟谷、洼地中,多为下降泉。一般为 20 °C 以下的低温泉。潜流溶滤成因矿泉水水文地质条件较简单,地下水循环周期相对较短。在补给区含水层接受大气降水后,地下水在重力作用下运移,途中不断溶滤岩土中矿物成分,经过一定浓缩作用后,于地形地貌及水文地质条件有利地带出露成泉^[26]。如呈贡七甸松茂矿泉水,出露于

侵蚀低中山沟谷二叠系上统峨嵋山组(Pe)玄武岩中,水温 17 °C,矿化度 96.2~49.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型水, pH7.2~8.8, H_2SiO_3 为 33.8~45.35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为偏硅酸型饮用天然矿泉水,1994 年开发为云南省天外天矿泉水。

流域内 S_1 、 S_3 、 S_5 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} 和 S_{12} 均为此类成因矿泉水。矿泉水多为潜水,受地形控制明显,具有循环深度较浅、周期较短、动态不稳定等特点,水量及水质随季节变化明显,地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主。矿泉水类型以偏硅酸矿泉水为主,玄武岩、变质岩多形成偏硅酸矿泉水,碳酸岩则以形成 Sr、Zn 微量元素矿泉水为主。

4 矿泉水资源远景评价

4.1 开采现状分析

洱海流域矿泉水资源较丰富,现状开发利用程度整体较低,医疗矿泉水(温泉)开发利用程度较高,现状主要用于洗浴休闲等。饮用矿泉水开发利用程度较低,多以灌溉、生活洗涤或零星饮用为主,未进行矿泉水价值的开发和利用,仅大理古城城区裂隙泉(S_9)开发为“大理矿泉”品牌矿泉水,整体开发利用状况详见表 4。

4.2 资源远景评价

依据调查成果资料,采用枯季泉流量、钻孔抽水试验涌水量等推算评价,流域内 12 个矿泉水点,除 S_1 、 S_2 、 S_4 及 S_{12} 4 个超采外,其余 S_3 、 S_5 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} 及 S_{11} 8 个现状开采量 75.68 万 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,允许开采量 147.75 万 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,剩余允许开采量 72.07 万 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ^[27](表 5),已开采量约占允许开采量的 51%,开发潜力较大,通过打井,可以进一步扩大开采量。且随着勘查程度和技术的不断提高,在一些尚未充分勘查区域,特别是构造断裂带、大型山脉迎风坡、河流源头或岩溶发育等重点靶区,将有更多的矿泉水资源被发现。

流域内矿泉水资源开发潜力大,但盲目开发或扩大开采会导致一系列资源和环境问题。少数矿泉水已超采,根据表 5, S_1 、 S_2 、 S_4 及 S_{12} 超采量分别占允许开采量 8%、77%、59% 及 59%,超采严重。过度开采会导致泉点干枯断流,也会使地下水与周围岩石的接触时间缩短,溶解的矿物质减少,影响矿泉水

表 4 洱海流域矿泉水资源开发利用现状
Table 4 Current situation of the development and utilization of mineral water resources in the Erhai lake basin

点号	位置	矿泉水类型	偶测流量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	现状开采量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	现状开发利用状况	利用率/%
S ₁	洱源县茈碧湖镇北排村北西300 m	饮用矿泉水	2 139.26	1 310.27	供下游村子约600人生活饮用	78
S ₂	洱源县茈碧湖镇大南村南东1 050 m		1 512.00	1 512.21	泉口围砌成封闭水池, 供附近村庄500~1 000人生活饮用及农田灌溉	100
S ₃	洱源县右所镇甘家村南50 m		161.59	16.17	沿溪沟灌溉下游农田, 大部分汇入西湖	10
S ₄	洱源县右所镇赶羊涧村北侧800 m		1 045.44	940.92	泉口修砌成2个蓄水池, 统一引水供3个村庄500~1 000生活饮用	90
S ₅	洱源县右所镇太平村南西50 m		130.46	13.15	零星用于农田灌溉	10
S ₆	洱源县牛街镇西村西北974 m		50.11	0	自然流淌, 汇入山沟	0
S ₇	洱源县牛街镇天官坟村东南775 m		1 371.17	457.03	部分供下游村庄生产生活使用, 剩余水量汇入水沟排至海西海水库	50
S ₈	洱源县右所镇秦家营村南侧		103.68	51.79	供附近少数村名生活饮用	50
S ₉	大理市大理古城区(已开发“大理矿泉”)		240.19	160.02	生产能力达到160 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	66
S ₁₀	洱源县茈碧湖镇石照壁村北西500 m		1 313.28	1 313.28	主要供洗浴休闲, 部分生活饮用	100
S ₁₁	大理市湾桥镇下崇村南唐僧寺内		622.08	62.20	少量用于农田灌溉, 大量排入东侧洱海	10
S ₁₂	洱源县茈碧湖镇伙山村北东100 m		3 523.39	3 171.28	泉口建成蓄水池, 引致下游主要供洗浴休闲	90

表 5 洱海流域矿泉水资源开采潜力
Table 5 Exploitation potential of mineral water resources in the Erhai lake basin

点号	位置	矿泉水类型	现状开采量/ $\text{万m}^3\cdot\text{a}^{-1}$	允许开采量/ $\text{万m}^3\cdot\text{a}^{-1}$	剩余允许开采量/ $\text{万m}^3\cdot\text{a}^{-1}$
S ₁	洱源县茈碧湖镇北排村北西300 m	饮用矿泉水	47.82	44.14	-3.68
S ₂	洱源县茈碧湖镇大南村南东1 050 m		55.19	31.20	-23.99
S ₃	洱源县右所镇甘家村南50 m		0.59	8.13	7.54
S ₄	洱源县右所镇赶羊涧村北侧800 m		34.34	21.57	-12.77
S ₅	洱源县右所镇太平村南西50 m		0.48	5.75	5.27
S ₆	洱源县牛街镇西村西北974 m		0	1.79	1.79
S ₇	洱源县牛街镇天官坟村东南775 m		16.68	49.08	32.4
S ₈	洱源县右所镇秦家营村南侧		1.89	3.52	1.63
S ₉	大理市大理古城区(已开发“大理矿泉”)		5.84	8.76	2.92
S ₁₀	洱源县茈碧湖镇石照壁村北西500 m		47.93	57.88	9.95
S ₁₁	大理市湾桥镇下崇村南唐僧寺内		2.27	12.84	10.57
S ₁₂	洱源县茈碧湖镇伙山村北东100 m		115.74	72.71	-43.03

品质, 还可能引起区域地下水位下降, 造成一系列生态环境问题, 存在较大环境安全风险; 另简单粗放的开发方式, 一方面浪费水资源, 另一方面导致开发效

益和价值低下, 如饮用矿泉水多用作灌溉、生活洗涤或零星饮用, 未充分挖掘和利用矿泉水自身蕴含的经济、生态及社会价值; 此外, 开采过程中如果不注

意环境保护,会导致地表水和污染物渗入地下,污染矿泉水资源。

4.3 勘查及开发利用建议

为实现流域内矿泉水资源的持续高效利用,提出以下优化建议措施:一是结合国土空间规划、城市发展、城镇及新农村建设规划,合理规划布局,因地制宜制定矿泉水资源开采及开发利用方案,充分利用泉水自流量,严控井采量,对超采矿泉水源地实施限采措施,并制定科学的削减计划,逐步恢复地下水位和泉流量;二是加强饮用矿泉水开发,拓展应用范围,研发高端瓶装水、功能性矿泉水饮料等,提升产品附加值,推广高效节水技术,提高水资源利用率;三是推动理疗矿泉水开发从单一洗浴、休闲向温水养殖、农业温室等多元产业融合发展,丰富服务项目与产品种类,鼓励矿泉水企业强化品牌建设 with 产品创新,充分挖掘矿泉水资源的潜在价值;四是划定矿泉水资源保护区,清晰界定保护范围,严格落实保护规定,加强监管,建立完善的污染应急预案,保障矿泉水资源的安全与质量;五是加大勘查投入,运用先进的钻探、物化探等技术,全面查明矿泉水资源的分布、储量、水质特征及成因机制,为科学规划和合理开发提供数据支撑;六是严格执行《云南省地下水管办法》等有关规定,加强管理,建立长期动态监测体系,为合理开发和科学管理提供依据。

5 结 论

(1)流域矿泉水资源包括偏硅酸饮用矿泉水、微量元素饮用矿泉水和理疗矿泉水,微量元素饮用矿泉水分布最多,占 41.6%;碳酸岩区多为 Sr、Zn 微量元素饮用矿泉水,玄武岩区则多为偏硅酸矿泉水。理疗矿泉水达医疗价值浓度和矿水命名浓度指标均在 3 项及以上。

(2)矿泉水资源主要呈条带状分布于流域西部,多出露于断裂褶皱发育、地层岩性变化频繁及岩浆岩广布区域,主要含水层为碳酸岩地层。

(3)区内水文地质条件简单、径流条件较好的碳酸岩、玄武岩中形成的饮用矿泉水多为潜流溶滤型成因类型。而断裂带对流型成因矿泉水,循环深、水温高,多为优质理疗矿泉水。

(4)矿泉水现状开发利用程度较低,开采潜力大,

盲目开发会导致环境风险、资源浪费、效益低下。需科学规划开采布局,加强勘察和监管力度,划定保护区,推动理疗矿泉水多元发展,以实现矿泉水资源持续高效利用。

参考文献

- [1] 宋德人. 我国饮用天然矿泉水的初步研究[J]. 地理科学, 1990, 10(4): 356-364, 388.
SONG Deren. A preliminary study on natural drinking mineral water of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1990, 10(4): 356-364, 388.
- [2] Monique van der Aa. Classification of mineral water types and comparison with drinking water standards[J]. Environmental Geology, 2003, 44(5): 554-563.
- [3] 苏春利, 李义连, 王焰新. 深圳市东湖矿泉水形成机理探讨[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 85-90.
SU Chunli, LI Yilian, WANG Yanxin. Mechanism of form discussion of Donghu mineral water in Shenzhen City[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(4): 85-90.
- [4] 赵帅军, 黄树春, 夏友, 李海兵, 曾艳华. 从基础地质角度研究湖南省矿泉水资源特征及成因规律[J]. 矿产与地质, 2017, 31(1): 187-193.
ZHAO Shuaijun, HUANG Shuchun, XIA You, LI Haibing, ZENG Yanhua. Discussion of resource characteristics and genesis regularity of mineral water in respect to basic geology in Hunan Province[J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(1): 187-193.
- [5] 牛俊强, 文美霞, 郭昆, 周宁, 叶腾升, 苏呈. 湖北省饮用天然矿泉水成因类型及成矿模式分析[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(1): 61-65.
NIU Junqiang, WEN Meixia, GUO Kun, ZHOU Ning, YE Tengsheng, SU Cheng. Analysis of genetic types and metallogenic model of potable natural mineral water in Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2019, 33(1): 61-65.
- [6] 金文正. 云南省洱源县断裂特征及其对地热的控制作用[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 57-71.
JIN Wenzheng. Characteristics of faults and their controlling effect on geothermal energy in Eryuan county, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(1): 57-71.
- [7] 单婷婷, 徐世光, 范柱国, 阮巍. 昆明西山偏硅酸矿泉水特征及形成机理[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 39-47.
SHAN Tingting, XU Shiguang, FAN Zhuguo, RUAN Wei. Characteristics and formation mechanism of metasilicate mineral water in Xishan mountain of Kunming[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(2): 39-47.
- [8] 迟帅, 徐世光, 郭婷婷. 云南松茂区矿泉水成因研究[J]. 中国水运, 2019, 19(2): 210-211.
- [9] 翟文秀, 伍尹桦, 伍早生. 云南省天然矿泉水资源开发利用现状及建议[J]. 云南地质, 2021, 40(4): 473-478.

- ZHAI Wenxiu, WU Yinben, WU Zaosheng. The development and suggestion of natural spring water of Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2021, 40(4): 473-478.
- [10] 张贵, 张华, 王波, 张文鋈, 高瑜, 何绕生, 周翠琼, 彭淑惠. 滇东岩溶高原矿泉水类型及地质控制[J]. *地球学报*, 2021, 42(3): 333-340.
- ZHANG Gui, ZHANG Hua, WANG Bo, ZHANG Wenjun, GAO Yu, HE Raosheng, ZHOU Cuiqiong, PENG Shuhui. Mineral water types and geological control in karst plateau of eastern Yunnan[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 333-340.
- [11] 王楠, 胥芹, 孙小艳, 武显仓, 李常锁, 高帅. 趵突泉泉域岩溶水化学特征及成因研究[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(2): 279-290.
- WANG Nan, XU Qin, SUN Xiaoyan, WU Xiancang, LI Changsuo, GAO Shuai. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of karst water in Baotu Spring watershed[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(2): 279-290.
- [12] 周鑫, 王璨, 郑鹏飞, 姚腾飞, 巫政卿, 米茂生, 覃佐辉, 李杨. 湘南泥盆系碳酸盐岩区富锶饮用天然矿泉水成矿规律: 以新田县新圩矿泉水为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(2): 197-209.
- ZHOU Xin, WANG Can, ZHENG Pengfei, YAO Tengfei, WU Zhengqing, MI Maosheng, QIN Zuohui, LI Yang. Metallogenic regularity of strontium-rich drinking natural mineral water in Devonian carbonate area in southern Hunan: Taking strontium-rich drinking mineral water in Xinxu town, Xintian county as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 197-209.
- [13] 储昭升, 高思佳, 庞燕, 王圣瑞, 熊仲华, 段彪, 杨学松, 赵继东. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 507-514.
- CHU Zhaosheng, GAO Sijia, PANG Yan, WANG Shengrui, XIONG Zhonghua, DUAN Biao, YANG Xuesong, ZHAO Jidong. Characteristics, problems and ecological protection and restoration measures of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland elements in Lake Erhai basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(5): 507-514.
- [14] 万晔, 韩添丁, 段昌群, 杨惠安. 滇西名山点苍山地区地貌结构与特征研究[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(2): 241-248.
- WAN Ye, HAN Tianding, DUAN Changqun, YANG Huian. Landform system structures and characteristics of the Diancang mountain areas in west Yunnan Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 241-248.
- [15] 林芸, 唐亚松, 刘刚, 刘胜. 洱海流域水资源量变化趋势分析[J]. *云南水力发电*, 2017, 34(6): 4-7.
- LIN Yun, TANG Yasong, LIU Gang, LIU Sheng. Analysis of the change trend of water resources in Erhai basin[J]. *Yunnan Water Power*, 2018, 34(6): 4-7.
- [16] 张春才, 郭加祥, 唐红明, 等. 云南省东部地区矿泉水调查报告[R]. 昆明: 云南省地质矿产局第一水文地质工程地质大队, 1988.
- [17] 李继洪, 刘涛, 黄玉, 等. 云南省地热能开发利用规划(2014-2020年)[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2014.
- [18] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [19] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 林永生, 王佳, 樊连杰, 李军, 蓝芙宁, 李衍青, 邓日欣, 缪雄谊. 四川昭觉地区优质偏硅酸地下水的特征、成因及其开发利用建议[J]. *中国地质*, 2022, 49(3): 849-859.
- ZHOU Changsong, ZOU Shengzhang, ZHU Danni, LIN Yongsheng, WANG Jia, FAN Lianjie, LI Jun, LAN Funing, LI Yanqing, DENG Rixin, MIAO Xiongyi. Characteristics, causes and development suggestions of high quality groundwater containing metasilicate in Zhaojue area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2022, 49(3): 849-859.
- [20] 苏春田, 杨杨, 巴俊杰, 罗飞, 李小盼, 赵光帅. 新田县富锶地下水动态特点与成因分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 24-33.
- SU Chuntian, YANG Yang, BA Junjie, LUO Fei, LI Xiaopan, ZHAO Guangshuai. Dynamic characteristics and genesis of strontium-rich groundwater in Xintian county, Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 24-33.
- [21] 孙智杰, 高宗军, 王新峰, 林海斌, 宋绵. 赣南山区矿泉水出露模式探讨[J]. *地球学报*, 2018, 39(5): 565-572.
- SUN Zhijie, GAO Zongjun, WANG Xinfeng, LIN Haibin, SONG Mian. Exploration of mineral water outcropping pattern in the mountainous area of south Jiangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 565-572.
- [22] 王志超, 王迪, 张兵华, 赵镇, 葛伟丽. 内蒙古饮用天然矿泉水地质成因和分布特征浅析[J]. *西部资源*, 2023(5): 17-24.
- [23] 王宇. 红层地下水富集规律[J]. *地质灾害与环境保护*, 2010, 21(2): 53-57.
- WANG Yu. Groundwater enrichment in red beds[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2010, 21(2): 53-57.
- [24] 王波, 王宇, 张贵, 张华, 代旭升, 康晓波. 滇东南泸江流域岩溶地下水质量及污染影响因素研究[J]. *地球学报*, 2021, 42(3): 352-362.
- WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, DAI Xusheng, KANG Xiaobo. A study of quality and pollution factors of karst groundwater in Lujiang river basin in southeast Yunnan[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 352-362.
- [25] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 114-119.
- WANG Yu. classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 114-119.
- [26] 王波, 张华, 王宇, 张贵, 张文鋈, 高瑜, 罗为群. 泸西喀斯特断陷盆地地表水与地下水流域边界与水动力性质[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 319-326.
- WANG Bo, ZHANG Hua, WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Wenjun, GAO Yu, LUO Weiqun. Watershed boundaries and hydrodynamic properties of surface water and groundwater in the Luxi karst fault-depression basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 319-326.
- [27] 王波, 郑礼永, 郭云, 等. 滇西北洱海流域典型湿地水文地质要素调查 2019 年度成果报告[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2019.

Characteristics and prospective evaluation of natural mineral water resources in the Erhai lake basin

WANG Bo^{1,2,3}, ZHAO Li^{1,2,3}, CHEN Xiaomei^{1,2,3}, ZHU Guangyi^{1,2,3}, ZHANG Gaoyin^{1,2,3}

(1. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract The Erhai lake basin is an area with a beautiful ecological environment and important cultural and economic value in Southwestern China; therefore, in-depth studies on mineral water resources in this region hold far-reaching significance in ecology, environment, economy and society. This study is based on the project of the investigation of hydrogeological elements of typical wetland environment in the Erhai lake basin, located in northwest Yunnan. It systematically summarizes, organizes, and analyzes various factors, including landforms, stratigraphy and lithology, geological structure, climate, and water quality, based on extensive investigations and sampling tests. By examining the characteristics of mineral water resources, this study elucidates their water quality, quantity, and distribution patterns. Through a long-term evaluation, it forecasts the development potential and sustainable utilization prospects of these mineral water resources, thereby providing robust support for ecological protection, sustainable water resource utilization, economic development, and social stability in the Erhai lake basin.

The mineral water resources in the basin encompass drinking mineral water containing both metasilicic acid and trace elements, and therapeutic mineral water. These resources are primarily distributed in a belt-like pattern across the western part of the basin, exhibiting higher abundance in the northwest and lower abundance in the southeast. They are more prevalent in mountainous areas and less so in the basin. These mineral water resources are typically located in regions with well-developed faults and folds, frequent variations in stratigraphic lithology, and a widespread presence of magmatic rocks. In terms of water quality characteristics, mineral water typically contains a high concentration of metasilicic acid. In areas with carbonate rocks, drinking mineral water often contains trace elements such as Sr and Zn. Conversely, in basalt regions, mineral water rich in metasilicic acid is more common. For therapeutic mineral water, both the concentration necessary for medical efficacy and the concentration required for classification as mineral water must meet or exceed three specific criteria. Based on the differences in the primary controlling factors of formation conditions—such as geological structure, topography, aquifer burial and distribution, and groundwater runoff circulation—the mineral water in the basin can be categorized into two types of genesis: fault-zone convection type and subsurface dissolution-filtration type. The fault-zone convection type constitutes 42% of the total and is characterized by deeper circulation, pressurization, higher water temperatures, and more stable dynamics. This type often yields high-quality therapeutic mineral water. In contrast, the subsurface dissolution-filtration type accounts for 58% and primarily produces drinking mineral water rich in metasilicic acid. This type is associated with simpler hydrogeological conditions, exhibiting characteristics such as shallower circulation depth, shorter cycles, and unstable dynamics. The Erhai lake basin is abundant in mineral water resources, which are currently underexploited, indicating significant potential for further development. Conducting research and analysis on the characteristics of these mineral water resources, performing long-term evaluations, and scientifically formulating protection and development strategies can help forecast the development potential and sustainable utilization prospects of mineral water resources. These efforts will contribute to the rational planning of the water resources development, help prevent over-exploitation, and ensure sustainable use. Furthermore, they will play a crucial role in maintaining the ecological balance of the basin, protecting biodiversity, and promoting the coordinated development of the regional economy and the environment.

Key words the Erhai lake basin, mineral water resources, groundwater, geological structure, exploitation potential

(编辑 杨 杨)