

周翠琼, 张贵, 张文鏊, 等. 岩溶高原山区表层岩溶泉绿能与高效开发利用模式[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 553-561.

DOI: 10.11932/karst20220405

岩溶高原山区表层岩溶泉绿能与高效开发利用模式

周翠琼^{1,2}, 张贵¹, 张文鏊^{1,2}, 高瑜^{1,2}, 何绕生^{1,2}, 王波^{1,2}, 张华^{1,2}, 彭淑惠^{1,2}

(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修复重点实验室, 云南昆明 650216)

摘要:为解决岩溶高原山区缺水的问题, 合理开发利用表层岩溶水, 开展了水文地质详细调查。查明区内表层岩溶泉出露 13 个, 流量 0~67.53 L·s⁻¹, 动态变化与降水关系密切。文章总结了表层岩溶水“泉—池(窖)—库”优化调控、绿能高效开发利用模式: ①在有砂泥岩夹层分布的凹部山岩溶洼地, 采用防渗帷幕灌浆, 建设悬挂式凹部山水库, 积蓄地表水、表层岩溶水形成自流供水; ②在湾半孔表层泉处建设蓄水池直接引流利用; ③在湾半孔表层泉附近建设水泵站、光伏电站, 平水期时通过光伏电站发电, 由泵站自动控制抽取表层岩溶水补给凹部山水库, 形成地表、地下水优化调控, 联合调度调蓄利用 25.3 万 m³·a⁻¹, 解决了区内 13 000 余人的生活生产用水困难问题。

关键词: 断陷盆地; 岩溶区; 表层岩溶水; 开发利用模式; 岩溶泉; 云南泸西

中图分类号: P641 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 04-0553-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

西南岩溶区岩溶分布面积约 42 万 km², 约占区域国土面积的 67.7%。虽然降雨量较丰富, 但受岩溶区地表地下双层岩溶结构发育的影响, 水源漏失迅速、强烈, 造成了该区域地表普遍干旱缺水。岩溶地下水普遍具有水量丰富、分布不均匀、埋深变化大、旱雨季节动态变化大等特点。为了开发利用岩溶水资源, 国内外许多学者进行了大量深入且有意义的研究, 从不同角度探讨地下水的开发技术方案、开发模式^[1-4]。由于岩溶发育的成层性特征, 岩溶区常发育有不同类型的表层岩溶带。蒋忠诚等^[5-10]对表层岩溶带进行了较为深入的研究, 认为表层岩溶水是赋存于表层岩溶带中的地下水, 是岩溶地区的极为宝贵的水资源之一, 对解决岩溶干旱缺水地区人畜饮

水困难有着重要意义。表层岩溶水既可以表层岩溶泉的形式排泄, 也可通过裂隙补给下部包气带参与深部地下水循环。表层岩溶水受降水的影响极为明显, 通常具有就地补给就地排泄的特点, 流量旱季、雨季相差悬殊, 动态变化很大, 多数表层泉流量较小, 旱季断流或近于断流, 故可有效利用的水资源量很少。因此, 在岩溶高中山区地下水深埋条件下^[11], 表层泉资源价值非常珍贵。如何优化利用表层岩溶水, 提高有限水资源的利用率, 是关系岩溶山区人民群众生产生活用水安全保障的重要问题, 因此, 对岩溶山区表层岩溶水开发利用较为普遍, 如建小水池、小水窖蓄积(一般容积仅为 $n \sim n \times 10 \text{ m}^3$)的“泉—窖、坡面流—窖”模式、建小坝塘蓄积的“泉—库”模式、采取直接引水利用的方式等^[12-20]。但岩溶高原高、中山区以太阳能发电为动力, 实现绿能、高效、廉价

资助项目: 国家重点研发计划专项(2016YFC0502502)

第一作者简介: 周翠琼(1972—), 女, 高级工程师, 长期从事水工环地质调查研究工作。E-mail: 407528806@qq.com。

收稿日期: 2022-02-20

持续开发利用表层岩溶水,构建地表—地下水联合调度系统的开发模式尚无报道。

泸西岩溶断陷盆地,盆底与盆缘高差悬殊,盆地东部边缘高出盆底 500~600 m,地貌类型主要为峰丛洼地,地表、地下岩溶发育,岩溶洼地、漏斗、落水洞遍布,水源漏失严重,无地表水系,区域地下水深埋,特殊的水文地质条件使得该区可利用的水资源十分缺乏,资源性缺水严重。但由于岩溶发育的不均匀性、成层性,局部有较多的表层岩溶泉出露。本文以高、中山溶蚀台面上的泸西湾半孔—凹部山峰丛洼地区表层岩溶水“泉—池(窖)—库”高效利用示范为例,探索总结了岩溶高原山区表层岩溶泉绿能、高效开发利用系统模式,为表层岩溶水优化开发利用提供了一种新思路,实施技术成熟,易于推广利用,可作为解决岩溶山区资源性缺水困难的范例。

1 地质条件

湾半孔—凹部山研究区位于泸西县城东南约 30 km,处于泸西盆地东部三塘高寒岩溶峰丛洼地区。三塘乡国土面积 216 km²,总体地势呈西北高、东南低,80%的地区海拔在 2 000 m 以上,为岩溶高、中山区,一般海拔在 2 150~2 225 m,最高点老佐坟海拔 2 459.3 m,最低点为南盘江与小江河谷的交汇口,海拔 820 m,最大相对高差 1 639.3 m。乡境内碳酸盐岩分布面积占国土面积的 94.4%。三塘乡 2017 年有人口 2.64 万人,人口密度 122 人/km²。水资源匮乏,耕地以旱地为主,水田仅有 30 亩,农作物主产玉米、洋芋、小麦、荞麦,经济作物以烤烟、油料、除虫菊、杜仲为主。年均气温 12 ℃,最高 33.8 ℃,最低-11 ℃,属典型的高寒岩溶山区。降水丰富,年均降水量在 1 250~1 950 mm,少部分年份在 650~700 mm,降水多集中在雨季 5—10 月,占全年降水量的 80%~88%,雨季月降水量多在 120~300 mm,年平均蒸发量 1 947 mm。大部份地区霜期在 200 d 左右,年均日照 2 100 h。

湾半孔—凹部山一带,一般海拔在 2 100~2 300 m,与泸西盆地相对高差 500 m 左右,为典型的发育于古溶蚀台面上的峰丛洼地区,洼地、落水洞发育,洼地密度一般 1~3 个/km²,直径 100~500 m,深度 30~100 m,洼地深度一般小于 100 m。局部洼地发育密度大,漏斗、落水洞发育密度最高可达 50 个/km²。

该区出露地层为个旧组(T_{2g}^{a-c})中厚层—块状泥晶灰岩、白云岩,其中,T_{2g}^{b2}段为薄—中层状泥岩、钙质泥岩、粉砂岩夹薄—中层状泥灰岩,T_{2g}^{b1}段为薄—中层状泥晶灰岩,白云质灰岩夹薄层泥灰岩、钙质泥岩。断裂发育较少,为 NS 向、NE 向。总体上为一单斜构造(图 1),地层倾向 SW,产状 105°~150°∠22°~26°。

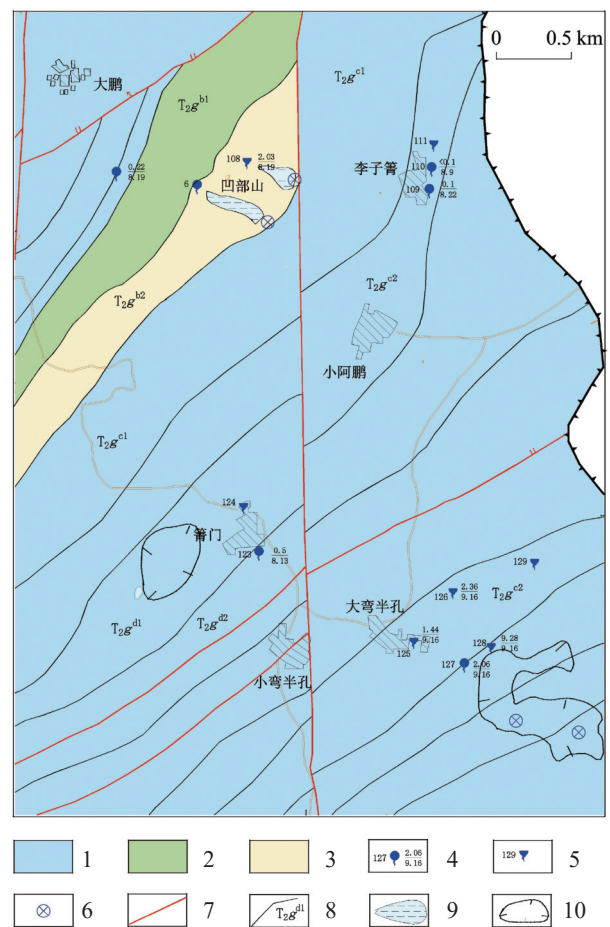


图 1 湾半孔—凹部山水文地质图

1—碳酸盐岩溶含水层 2—碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶含水层 3—碎屑岩相对隔水层 4—泉,编号,流量(L·S⁻¹)/日期 5—季节泉,编号 6—典型落水洞 7—断层 8—地层界线及代号 9—水库 10—典型洼地

Fig. 1 Hydrogeological map of Wanbankong-Aobushan

区内基岩裸露,地表、地下双层结构岩溶发育,大气降水几乎全部渗入地下,无地表河流及常流大泉,蓄水条件差,地下水以垂直渗流为主,地下水饱水带深埋,区域地下水位埋深大于 200 m,开发难度极大。20 世纪 80 年代在方摆村、小湾半孔施工的钻孔,孔深分别为 204.27 m、296 m,旱季时 2 个钻孔都无水。虽然区内降水丰富,但洼地内漏失严重,渗漏迅速,雨季无积水,水资源稀缺,因此,表层岩溶水资源价值非常珍贵。区内现状仅建有凹部山水库,

库容 14 万 m^3 ; 竹源地水库, 库容 10.9 万 m^3 。总体上, 干旱缺水仍十分严重。

2 表层岩溶水资源特征

2.1 表层岩溶带结构特征

区内碳酸盐岩分布广, 表层岩溶带较发育, 但在平面分布上具有不连续且厚度不稳定的特点, 厚度一般 10~20 m。由于地层岩性的不同, 表层岩溶带的结构亦有较大区别, 可划分为两类, 一类是碳酸盐岩层中存在泥质夹层, 泥质夹层相对隔水, 如 T_2g^{d2} 地层, 灰岩、白云岩岩溶发育, 以溶隙、溶孔为主, 而夹于薄—中层状泥晶灰岩其间的极薄层、薄层泥灰岩、钙质泥岩, 溶蚀微弱, 容易风化, 泥质容易充填裂隙使透水性变弱, 成为相对隔水层, 限制了上部地下水向深部饱水带径流, 形成了湾半孔一带复杂的表层岩溶带结构。另一类是碳酸盐岩层中因上部裂隙发育、溶蚀较强, 下部溶蚀较弱形成相对隔水层, 如箐门一带的表层泉, 发育于 T_2g^{d2} 白云岩中, 上部白云岩呈碎裂结构, 节理裂隙、风化裂隙极为发育, 岩体十分破碎, 呈砂状, 俗称“砂状白云岩”, 呈透镜状、条带状分布, 岩溶发育微弱, 仅有针孔状溶孔, 岩体具有裂隙特征, 形成表层岩溶带。

2.2 表层岩溶水动态特征

区内出露表层泉水较明显的有 13 个, 多处于洼地边缘。大气降水是表层岩溶水主要的补给来源, 因气候较为寒冷, 冬季雾天多, 水汽凝结, 也容易补给表层岩溶水, 是表层岩溶地下水的另一个补给源。区内表层泉径流途径短, 循环深度浅, 具有就地补给就地排泄的特点, 动态变化受降水影响控制明显, 反映比较敏感, 季节性强, 动态变化大(表 1, 图 2)。但由于含水介质结构的不同, 动态变化表现出明显的差异, 大部分表层泉旱季近于断流或断流, 少部分为常流泉, 部分表层泉水具有遇雨成泉, 雨后不久即断流的特点, 如 126 号表层泉, 仅在雨季期间大雨时才出流, 流量最大时 $20 L \cdot s^{-1}$, 但一般出流 1~3 d 即断流。总体上泉流量在时间上分配均一性极差, 动态变化与降水量关系十分密切, 一般泉流量多集中在雨季的 6-10 月, 约占全年流量的 90% 以上, 而旱季水量一般小于年总量的 10%。

表层岩溶带对岩溶水流过程的调蓄主要取决于

表 1 湾半孔表层岩溶泉流量动态特征表 (2004 年)

Table 1 Dynamic characteristics of discharge of discharge of surface karst springs in Wanbankong(2004)

编号	最小流量/ $L \cdot s^{-1}$	最大流量/ $L \cdot s^{-1}$	动态系数
箐门124	0	3.06	会断流
湾半孔125	0	30	断流但不干涸
湾半孔126	0	20	会断流
湾半孔127	0.4	24.86	62.2
湾半孔128	0	67.53	会断流
凹部山6	0.45	5.62	12.5
李子箐110	0.04	0.11	2.8
李子箐111	0	2	会断流
李子箐109	0.2	10	50

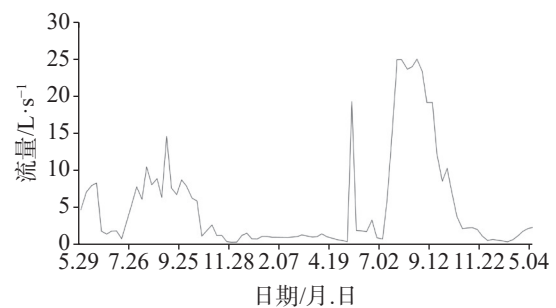


图 2 湾半孔 127 号表层泉 2003-2005 年动态历时曲线图

Fig. 2 Dynamic diachronic curve of No. 127 surface spring in Wanbankong from 2003 to 2005

表层岩溶带的结构。表层泉可造成特殊的岩溶水循环过程—表层岩溶带的岩溶水循环。在峰丛洼地区的水循环路径为: 雨水—入渗至表层岩溶带—表层岩溶泉—洼地—落水洞。高中山区表层岩溶泉的高位有效调节利用和与地表水联合调度, 发挥地下水的水量水质调节功能, 可大大提高岩溶山区水资源的利用效率, 典型的如湾半孔表层泉。

2.3 水质特征

该区表层岩溶水化学类型较单一, 旱、雨季节无明显变化, 均为 HCO_3-Ca 型水, pH 在 7.3~8, 总硬度为 $195.06 \sim 264.33 mg \cdot L^{-1}$, 溶解性总固体含量为 $482.3 mg \cdot L^{-1}$, 硝酸盐旱季期间含量较高, 有时水质可达到 IV-V 标准, 微生物污染也较严重, 如湾半孔表层泉, 2017 年 4 月旱季时, 菌落总数 $610 CFU \cdot mL^{-1}$, 总大肠菌群 $>1600 MPN \cdot (100 mL)^{-1}$ 。一般情况下, 表层泉水水质较好, 适宜工农业用水, 经适当处理后, 亦适宜生活饮用。

3 绿能、高效开发利用模式

3.1 工程方案及关键技术

研究区处于泸西盆地东部边缘高寒的峰丛洼地区，与周边地表水源距离远，距泸西盆地底部水源直线距离约有 10 km，高差 500~600 m，距东部南盘江河谷区的方摆村岩溶大泉直线距离约有 8 km，高差 600~700 m，要实施工程性提水可行性很差，即便采取多级提水工程，分散供水后续运行维护将极为困难，可持续性差，因此，需要另寻出路。该区虽极度干旱缺水，但局部有表层泉出露，只要利用得当则可成为资源价值非常珍贵的水资源。

为了寻找可靠水源，在湾半孔—凹部山峰丛洼地区，开展水文地质详细调查，重点对地层岩性、岩溶发育特征、表层岩溶泉动态特征等进行详细调查研究。研究区为资源性极度干旱缺水岩溶山区，依据地质环境条件，湾半孔—凹部山表层岩溶水综合利用开发工程，工程方案应因地制宜，充分利用地质环境条件，充分利用表层岩溶水，提高水资源利用率，适宜建设“泉—池(窖)—库”开发利用工程：①选择适宜岩溶洼地，采取防渗帷幕灌浆，建设高位悬挂式溶洼水库，积蓄地表水、表层岩溶水；②在表层泉出露点处修建蓄水池，积蓄利用表层岩溶泉；③在表层泉附近建设光伏电站、抽水站，电站自动发电抽水，充分利用表层岩溶泉水的调蓄功能，在平水期抽取表层泉水，补给水库水源，扩大水库供水能力，形成“泉—池(窖)—库”联合供水网络系统，综合利用地表水、表层岩溶水。开发利用模式见图 3。

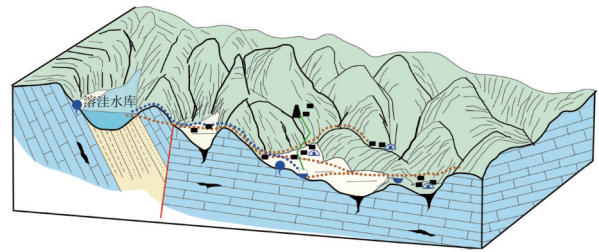


图 3 表层岩溶水“泉—池(窖)—库”综合利用开发模式图
1—灰岩 2—砂泥岩 3—洼地落水洞 4—岩溶 5—表层泉 6—蓄水池
7—水窖 8—上行提水系统 9—下行供水系统 10—村庄
11—光伏电站 12—输电线路

Fig. 3 Comprehensive utilization model of surface karst water, i.e., “spring-pond-cellar” model

3.2 高位悬挂式溶洼成库

凹部山水库，位于碳酸盐岩夹碎屑岩地层中。水库位于岩溶洼地中，洼地呈不规则长条形，北西向延伸，长轴长约 1 000 m，上口宽 400~500 m，底宽 25~50 m，最大切割深约 100 m，汇水面积约 0.25 km²，洼地底部向南东倾斜，坡降 5%，底部为残坡积黏性土覆盖，厚 0~10 m，洼地东部边缘上部发育有一个小溶洞。洼地上游出露 T_{2g}^{b1} 灰岩、泥质灰岩夹泥岩透镜体，岩溶较发育，岩层向下游倾斜，倾角 20°~30°，出露有表层岩溶泉，流量 0.45~5.62 L·s⁻¹，洼地中、下游出露 T_{2g}^{b2} 泥岩、钙质泥岩(图 4)，洼地最下游底部出露灰岩，在碎屑岩与碳酸盐岩接触带处发育 1 个落水洞，对水库蓄水极为不利，建设水库时需避开落水洞。

库区内钻孔孔深 8.05~47 m。勘探证实，泥岩、

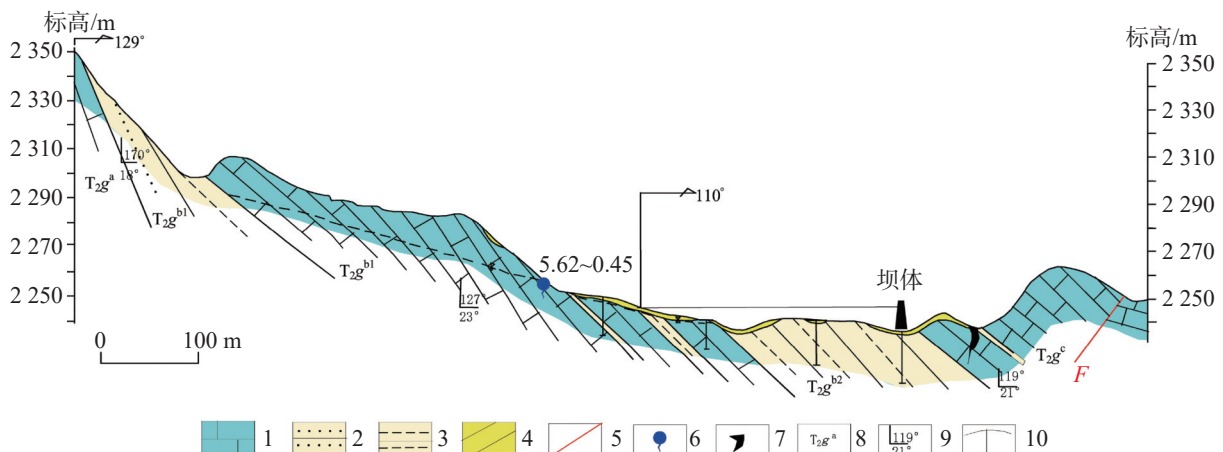


图 4 凹部山水库水文地质剖面图

1—灰岩 2—砂岩 3—泥岩 4—黏土 5—断层 6—泉水 7—落水洞 8—地层代号 9—地层产状 10—钻孔

Fig. 4 Hydrogeological section map of Aobushan reservoir

粉砂岩为该区域的相对隔水层,岩溶水与裂隙水水力联系微弱,地下水自北西向南东径流,与洼地倾斜方向基本一致,地下水水力坡度4.9%~15.4%,差异较大,具有在洼地内建设小水库的地质条件。为建设凹部山水库,选择洼地下游的泥岩、粉砂岩为坝址区,坝址区泥岩、粉砂岩风化强烈,弱风化带埋深6~15 m,风化带渗透性较强。勘查时,在泥岩、粉砂岩中选择了2个坝址作渗漏情况详查,因洼地蓄水库容十分有限,为保证水库能正常蓄水,对坝基处透水率 >5 Lu的地层需进行防渗处理。经对比, I 坝址

渗漏带(岩层透水率 >5 Lu为渗漏带)呈带状分布(图5),渗漏带深度1.9~16.3 m,防渗深度相对较浅、较为有利。工程实施,在洼地下游 I 坝址处泥岩、粉砂岩风化带中,采用防渗帷幕灌浆,防渗深度1.9~16.3 m,在防渗坝基处建筑土坝,坝高22 m,坝长210 m,建成凹部山小(二)型高位悬挂式溶洼水库,主要积蓄大气降水和极少量表层岩溶泉水,总库容14万 m^3 。经多年实践证明,水库运行良好,成为三塘乡的最重要供水水源,但因库容有限,供需矛盾仍十分突出。

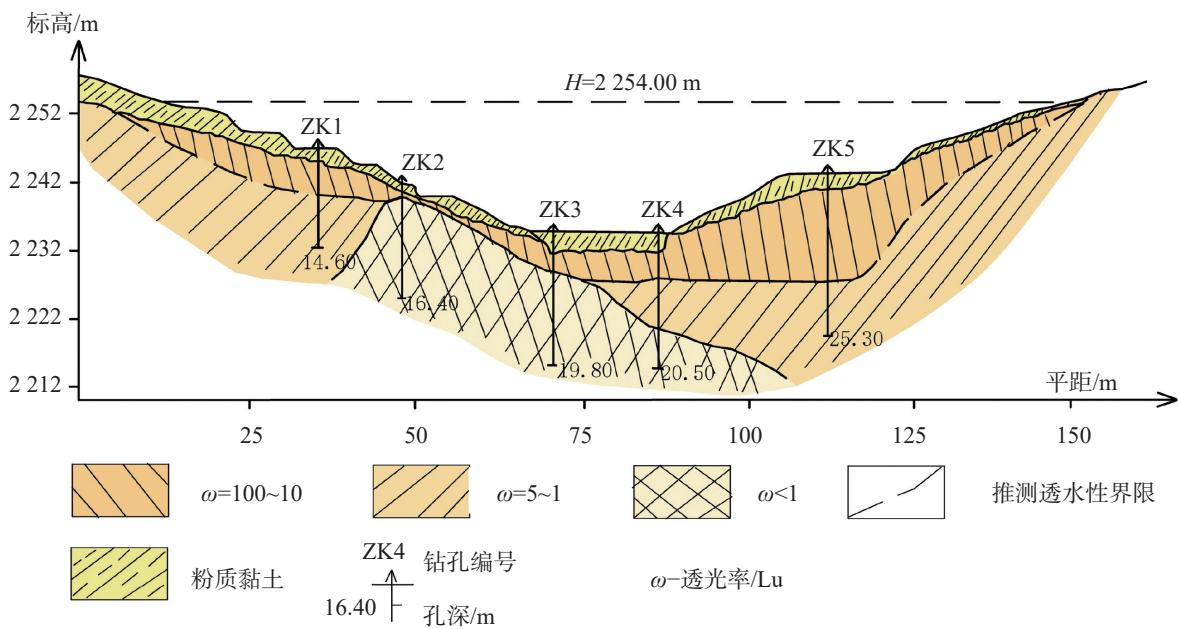


图5 凹部山水库坝址渗漏带防渗剖面图

Fig. 5 Anti-seepage section of the seepage zone at the dam site of Aobushan reservoir

3.3 表层岩溶泉积蓄利用

该区表层泉出露较多。湾半孔洼地近似椭圆形,深约80 m,北西向展布,长轴长约1 km,宽约0.5 km,洼地周边出露地层为 T_2g^c 灰岩、 T_2g^d 白云岩,基岩裸露,洼地底部发育有落水洞。洼地上部边缘发育有4个表层泉^[21],流量动态变化大,127号表层泉不断流,流量 $0.4\sim 24.86\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,一般流量自7月初逐步增大,9月中旬至11月初衰减速度较快;128号表层泉流量 $0\sim 67.53\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,一般自5月底出流,8月、9月份达到峰值,12月底开始断流;125号表层泉流量一般自5月底开始断续出流,9月初断流;124号表层泉一般自5月底出流,9月中旬至10月初衰减速度较快,12月底断流。湾半孔洼地中表层泉流量较大,出露

位置相对较高,资源价值非常珍贵。因此,对湾半孔表层泉的开发要充分发挥其供水和环境功能,利用其流动、水质较好的特点,建设水池与已有的输水管网、蓄水池相连接,将下游多个蓄水池的“死水”变为“活水”,使得池水水质得到改善。通过调查,选择127号、128号表层泉为开发点,两个泉年排泄总量合计60.67万 m^3 ,设计在表层泉口的下方修建容积1500 m^3 蓄水池2个,蓄积表层岩溶水,直接蓄积引流利用,为保护水质,在蓄水池上建盖铝合金顶棚进行封闭,再用6吋引水管将水引入现有供水管网系统,供给下游村寨的水池、水窖用水,形成“泉—池—窖”联网调节使用的表层岩溶泉开发利用模式,开采量约 $7.3\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,占年排泄总量的12%。

3.4 “泉—池（窖）—库”综合利用

该区水资源时空分布极不均一，雨季期间降水丰富，部分表层泉流量大，但因漏失严重，无储存条件，水资源的利用率很低。由于受地质条件制约，凹部山水库库容仅有 14 万 m³，并且无外源水补给，只能在雨季期间积蓄降水、表层泉水，蓄水量难于满足供水需求。

凹部山水库、湾半孔表层泉二者距离约 4 km，凹部山水库高于湾半孔表层泉，高差约 100 m。湾半孔表层泉流量虽较大，但因动态变化很大，除建池直接蓄积引流利用的 7.3 万 m³·a⁻¹ 的水量外，雨季大部分水量(约 49.37 万 m³·a⁻¹，占年排泄总量的 81.4%)

都通过 1 号落水洞进入地下而未能利用。因此，以凹部山水库、湾半孔表层泉为主要供水水源，充分利用表层岩溶水对降水的反应具有一定的滞后性这一调蓄功能，建设“泉—池（窖）—库”地表水、表层岩溶水综合开发利用工程(图 6)，可提高表层岩溶水资源的利用率。即，在湾半孔表层泉旁建蓄水池、抽水泵站，在蓄水池中安装 2 台 80 m³·h⁻¹ 的潜水泵，在距表层泉 400 m 的开阔斜坡地带建设光伏电站一座，装机容量 30 kW，光伏电站发电后通过输电线路供给抽水泵站使用，泵站自动控制，在表层泉流量较大的雨季-平水期，从下游湾半孔表层泉蓄水池中抽水补给上游凹部山水库水源。通过抽水补给工程的实施，充分利用原本无法利用的雨季表层泉流量，向凹部

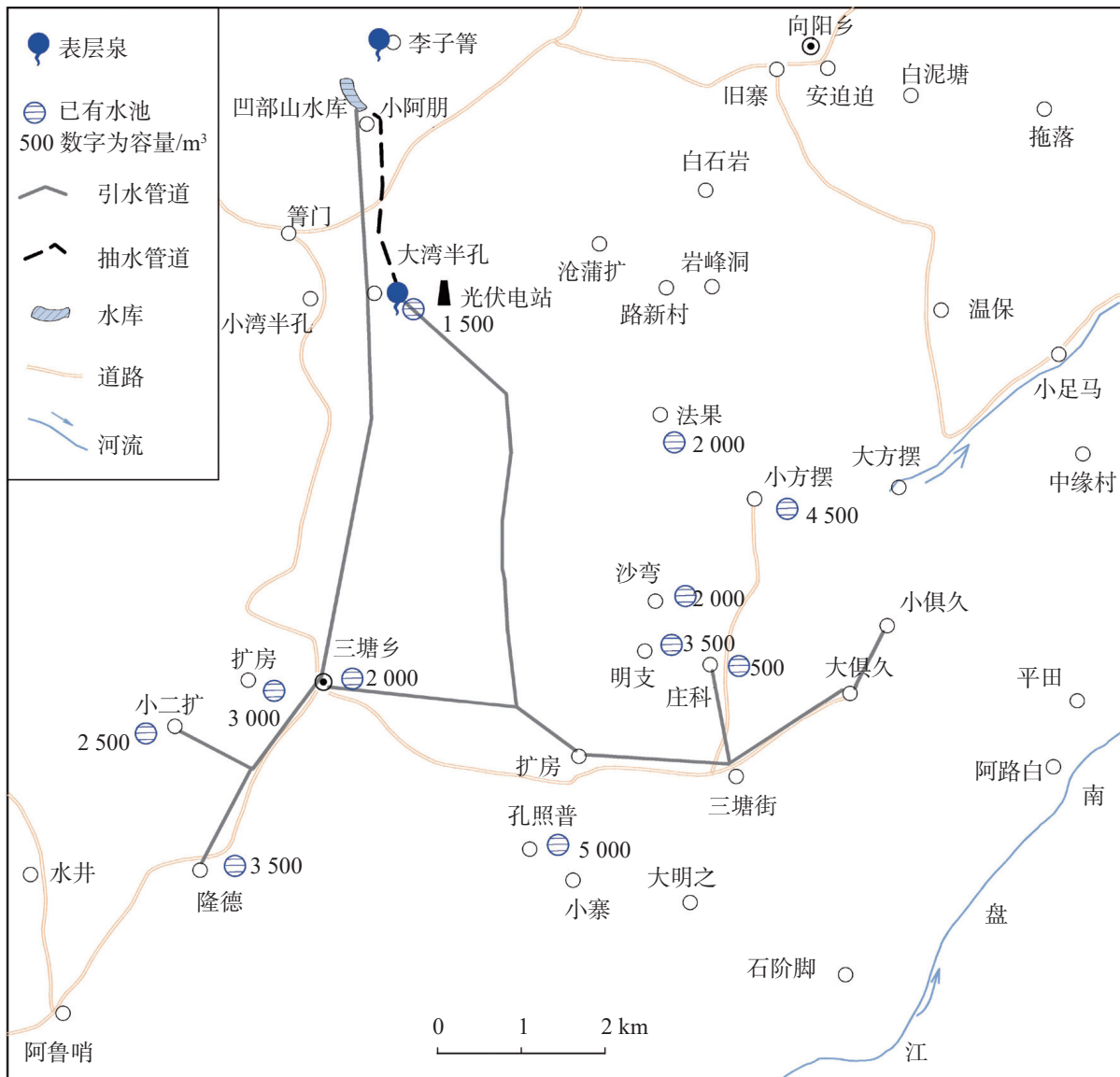


图 6 湾半孔—凹部山表层岩溶水综合利用示范工程

Fig. 6 Demonstration project for comprehensive utilization of surface karst water in the Wanbankong-Aobushan area

山水库补水量约 $4 \text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 相当于在无法扩大水库实际库容的前提下, 间接增加水库平水期—枯水期间的库容量, 将凹部山水库库容由 14万 m^3 扩大到 18万 m^3 , 扩大了水库的旱季供水能力, 形成地表、地下水联合调度, 优化调控利用的“泉—池(窖)—库”绿能、高效利用的供水网络系统, 调蓄利用表层泉水、地表水 $25.3 \text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 使水资源利用率(水库供水能力)提高了 28.6%。

4 生态经济效益

三塘乡处于峰丛洼地区, 地表无河流及常流大泉, 水资源奇缺, 旱地灌溉及人畜生活饮水十分困难, 缺水是三塘乡贫困的主要根源之一。凹部山—湾半孔“泉—池(窖)—库”地表、地下水绿能、高效利用工程的实施, 较大限度地利用了该区有限的地表、地下水资源, 调蓄利用量 $25.3 \text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 解决了三塘乡 13 346 人的生活用水困难, 占全乡总人口 2.64 万人的 50%, 极大地改善了三塘乡人民群众的生产生活条件; 同时还解决了万余亩旱地抗旱保苗用水, 对三塘乡粮食生产稳步提高占有极其重要的地位, 此外, 还可种植蔬菜等价值较高的经济作物, 社会经济生态效益十分显著, 推动了全乡经济发展。是高寒岩溶山区峰丛洼地区因地制宜, 有效利用表层岩溶水资源解决缺水困难的成功案例。

5 结论

(1) 岩溶高原山区普遍地下水埋深较大, 开发利用困难。但局部区域由于岩溶发育的成层性, 地表浅部常有表层岩溶泉出露, 具有分布位置较高, 流量动态变化大, 季节性强, 容易开采利用等特点, 是地下水深埋的岩溶干旱缺水山区资源价值非常珍贵的水资源之一;

(2) 表层岩溶泉的开发可充分利用地质环境条件, 采用“泉—池(窖)—库”优化调控、绿能高效开发利用模式。即, 在有相对隔水层分布的岩溶洼地, 采用防渗帷幕灌浆, 在高位建设悬挂式溶洼水库蓄积地表水自流引水利用; 在流量大的表层泉处建设蓄水池自流引水利用; 同时, 可在泉附近建设水泵站、光伏电站, 利用表层岩溶水对降雨的延迟调蓄功能, 在平水期表层泉流量还较大时, 通过光伏电

站自动发电抽取表层岩溶水补给上游溶洼水库, 实现虽无法扩大库容, 但可增加水库旱季供水能力, 形成地表、地下水联合调度供水, 提高表层岩溶水资源利用率;

(3) 凹部山—湾半孔“泉—池(窖)—库”绿能与高效利用工程的实施, 调蓄利用表层泉水、地表水 $25.3 \text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 解决了三塘乡 13 346 人的生活用水困难, 同时还解决了万余亩旱地抗旱保苗用水, 社会经济生态效益十分显著。示范工程实施技术成熟, 可作为解决岩溶山区资源性缺水困难的样板。

参考文献

- [1] 王宇, 张贵, 李丽辉, 等. 岩溶找水与开发技术研究[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
WANG Yu, ZHANG Gui, LI Lihui. Study on karst water exploration and development technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [2] 夏日元, 等. 西南岩溶石山区地下水资源调查评价与开发利用模式[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
XIA Riyuan, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and development and utilization mode in karst rocky mountainous areas of Southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [3] 张华, 王波, 王宇, 张贵, 何绕生, 代旭升, 康晓波, 蓝美宁. 云南泸西岩溶断陷盆地水循环系统及水资源循环利用方案[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 313-323.
ZHANG Hua, WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, HE Raosheng, DAI Xusheng, KANG Xiaobo, LAN Funing. The water circulation system and water resources recycling plan of the Luxi karst fault-depression basin in yunnan[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 313-323.
- [4] 张贵, 周翠琼, 王波, 顾维芳, 戴文敏, 张文盛. 滇东南岩溶区找水打井经验: 以云南省广南县珠琳地区为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 626-632.
ZHANG Gui, ZHOU Cuiqiong, WANG Bo, GU Weifang, DAI Wenmin, ZHANG Wenjun. Experiences of well drilling for water search in karst areas of southeastern Yunnan Province: An example of the Zhulin area, Guangnan county[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 626-632.
- [5] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 何师意. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. 中国岩溶, 2001, 20(2): 106-110.
JIANG Zhongcheng, WANG Ruijiang, PEI Jianguo, HE Shiyi. Epikarst zone in South China and its regulation function to karst water[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(2): 106-110.
- [6] 劳文科, 李兆林, 罗伟权, 梁彬. 洛塔地区表层岩溶带基本特征及其类型划分[J]. 中国岩溶, 2002, 21(1): 30-35.
LAO Wenke, LI Zhaolin, LUO Wei-quan, LIANG Bin. Main features and classification of epikarst in Luota area[J]. *Carsologica*

- Sinica*, 2002, 21(1): 30-35.
- [7] 夏日元, 陈宏峰, 邹胜章, 等. 表层岩溶带研究方法及其意义[A]//中国岩溶地下水与石漠化研究[C]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2003, 141-147.
XIA Riyuan, CHEN Hongfeng, ZOU Shengzhang, et al. Study method of surface karst zone and its significance [A]// Study on karst groundwater and rocky desertification in China [C]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2003, 141-147.
- [8] 章程, 袁道先, 曹建华, 蒋忠诚. 典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究[J]. *地球学报*, 2004, 25(4): 467-471.
ZHANG Cheng, YUAN Daoxian, CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng. An analysis of short-term scale variation of the typical epikarst spring[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(4): 467-471.
- [9] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 250-254.
QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng. A review on recent advances and perspective in epikarst water study[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(3): 250-254.
- [10] 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.
WANG Yu. Classification and exploitive technical condition of karst water source field in Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 370-374.
- [11] 王宇. 云南省岩溶水开发利用条件分析评价[J]. *水利学报*, 2001(1): 49-52.
WANG Yu. Study on explotation and utilization condition of karst groundwater in Yunnan Province[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(1): 49-52.
- [12] 劳文科, 祁晓凡, 刘慧敏, 蒋忠诚, 覃小群, 覃星铭. 广西果化龙何地区表层带岩溶水系统及其水资源特征[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(2): 122-128.
LAO Wenke, QI Xiaofan, LIU Huimin, JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, QIN Xingming. Characters of epikarst water system and water resources in Longhe, Guohua, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(2): 122-128.
- [13] 洛塔岩溶地质研究组. 洛塔岩溶及其水资源评价与利用的研究[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
Luota Karst Geology Research Group. Luota karst and its water resources evaluation and utilization research [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [14] 王腊春, 史运良. 西南喀斯特峰丛山区雨水资源有效利用[J]. *贵州科学*, 2006, 24(1): 8-13.
WANG Lachun, SHI Yunliang. The availability of rainwater resources at karst mountains in Southwest China[J]. *Guizhou Science*, 2006, 24(1): 8-13.
- [15] 朱海彬, 任晓冬, 李开忠. 贵州喀斯特地区表层岩溶带水资源开发利用研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015 (1): 60-63.
ZHU Haibin, REN Xiaodong, LI Kaizhong. The development and utilization of water resources in the epikarst zone of karst areas in Guizhou[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015 (1): 60-63.
- [16] 姜光辉, 郭芳. 表层岩溶水的水资源管理与开发工程设计[J]. *水文*, 2008, 28(4): 31-33.
JIANG Guanghui, GUO Fang. Water resources management and exploitation design of epikarst spring[J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(4): 31-33.
- [17] 贺卫, 李坡, 吴克华. 花江峡谷示范区表层岩溶水资源的开发与保护[J]. *水资源保护*, 2011, 27(2): 13-17.
HE Wei, LI Po, WU Kehua. Epikarst water resources development and protection in Huajiang Gorge exemplary area[J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(2): 13-17.
- [18] 任蕊, 杨成程, 匡野. 乌蒙山岩溶缺水地区表层岩溶泉有效开发模式研究[J]. *地下水*, 2018, 40(2): 24-26.
REN Rui, YANG Chengcheng, KUANG Ye. Study on the exploitation model of epikarst spring karst water Wumengshan area[J]. *Ground water*, 2018, 40(2): 24-26.
- [19] 彭淑惠, 李继红. 滇东岩溶区表层岩溶水源地特征及其开发利用[J]. *云南地质*, 2006, 25(2): 249-255.
PENG Shuhui, LI Jihong. The characteristics & developmen of epigenic karstwater in East Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2006, 25(2): 249-255.
- [20] 王宇, 张贵. 泸西小江流域水文地质特征及岩溶水有效开发利用[A]//中国岩溶地下水与石漠化研究[C]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2003, 189-196.
WANG Yu, ZHANG Gui. Hydrogeological characteristics and effective Development and utilization of karst water in Luxi Xiaojiang basin [A]//Study on Karst groundwater and Rocky desertification in China [C]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2003: 189-196.
- [21] 云南省地质调查院. 泸西小江流域岩溶水调查开发与石漠化综合治理示范[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2005.
Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring. Investigation and development of karst water and comprehensive control demonstration of rocky desertification in Luxi Xiaojiang Watershed[R]. Kunming: Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, 2005.

Green energy and its high-efficiency utilization model of surface karst springs in karst plateau mountainous area

ZHOU Cuiqiong^{1,2}, ZHANG Gui¹, ZHANG Wenjun^{1,2}, GAO Yu^{1,2}, HE Raosheng^{1,2},
WANG Bo^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, PENG Shuhui^{1,2}

(1. Yunnan Institute of Geological Environmental Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Key Laboratory of Plateau Geohazards Monitoring & Warning and Ecological Conservation & Restoration, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract To solve the problem of water shortage in karst plateau mountainous area, this study on the model of development and utilization of surface karst water is conducted. The karst mountainous area in east border of Luxi basin is a typical cluster-peak depression region with an average altitude from 2,100-2,300 m. Depressions and sinkholes are developed there. Outcrops in this area are mainly composed of limestone and dolomite in sections a, c, d and e of Gejiu formation (T_2g), and partially composed of T_2g b mudstone, calcareous mudstone, stacked siltstone with marlstone and limestone. The area is generally a monoclinical structure. Detailed hydrogeology research shows that there are 13 exposed epikarst springs with the flow of $0-67.53 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ due to precipitation. The water leakage in this area is fast, and drought and water shortage are very severe. Thus, surface karst water becomes a very valuable natural resource. This article summarizes a green, high-efficient method of development and utilization of surface karst water as "spring-pool(cellar)-reservoir" optimal management model. In karst concave depression area with siltstone, the grouting with anti-seepage curtain was conducted at the grouting depth of 1.9-16.3 m. An earth dam was built at an anti-seepage foundation and a reservoir with a total storage of $140,000 \text{ m}^3$ was constructed to reserve surface water and surface karst water to supply the downstream villages. Below the nozzles of epikarst springs with large flows in Wanbankong depression area, two 1,500-square-meter storage ponds were built to connect the current water supply network for downstream villages. This model of development and utilization of surface karst water is called "spring-pond-cellar" linkage model with an exploitation quantity of around $73,000 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$. The distance between Aobushan Reservoir and Wanbankong epikarst spring is around 4 km and the reservoir is around 100 m higher than the Wanbankong spring. The flow of the Wanbankong epikarst spring is quite big but very unstable and cannot be reserved. Most of the water in rain season (around $493,700 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ accounting for 81.4% of the annual volume) enters to the underground through sinkhole and cannot be utilized.

To make the most of reservoir regulation function from surface karst water against rainfall, a pump station and a photovoltaic power plant have been built near the Wanbankong epikarst spring. In the rainy season-water stable period with large flows, electric power is generated from the photovoltaic power plant and the pump station will draw surface karst water (around $40,000 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$) to the upstream Aobushan reservoir. Thus, the reservoir capacity increases from $140,000 \text{ m}^3$ to $180,000 \text{ m}^3$ under the condition that the reservoir cannot be expanded. In this case, the water supply capacity will increase in dry season. The surface water and underground water are regulated optimally and the total volume of surface spring water and surface water is up to $253,000 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$. This model may solve the problem of over 13,000 people's domestic and production water demand, as well as the water demand from seedling over 10,000 Mu in the dry season.

Key words fault basin, karst area, surface karst water, utilization model, karst spring, Luxi in Yunnan

(编辑 张玲 杨杨)