

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

张 华¹⁾, 王 波¹⁾, 王 宇^{2)*}, 张 贵¹⁾, 何绕生¹⁾, 代旭升¹⁾,
康晓波¹⁾, 蓝芙宁³⁾

1) 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 2) 云南省地质调查局, 云南昆明 650051;

3) 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004

摘 要: 云南泸西岩溶断陷盆地水资源丰富, 但水资源时空分布极为不均, 水资源利用率低。盆地地貌具有水平分区明显, 垂向分级清楚的特点, 盆底沉积平坝区是南盘江流域的局部上层排泄基准, 其间残存和恢复重建的湿地具有调节和净化水的功能, 且高程接近于供水需求区带。因此, 分析和构建地表水-地下水联合调度的水资源循环利用方案, 可有效提高水资源的利用率。通过研究泸西典型岩溶断陷盆地流域的地质环境条件与水循环系统, 查明其水资源赋存状况、可开发资源量和开发利用现状, 以地球系统科学为指导, 应用系统分析、水文及水文地质分析评价等方法, 结合黄草洲、平海子湿地生态的恢复重建和涵养, 提出岩溶断陷盆地水资源的循环利用方案, 一是黄草洲湿地生态的恢复重建和涵养, 采用物理、生物、化学措施进行水处理净化, 泵站提水供应生产、农业灌溉循环利用, 形成生态恢复工程-资源循环利用的方案; 二是工农隧道调蓄时空不均的内涝, 引自平海子水库, 旱季供灌溉、雨季供发电; 有效提高岩溶断陷盆地水资源的循环利用水平。云南岩溶断陷盆地众多, 可在盆地下游建湿地或净化池, 处理生活污水和地表水, 提水输送、隧道引水调蓄内涝、抗旱, 解决时空不均的水资源利用。该方案可操作性强, 在断陷盆地推广运用前景好。

关键词: 岩溶断陷盆地; 水资源系统; 水循环利用; 生态水文地质; 云南泸西

中图分类号: P641.134 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2020.090603

The Water Circulation System and Water Resources Recycling Plan of the Luxi Karst Fault-depression Basin in Yunnan

ZHANG Hua¹⁾, WANG Bo¹⁾, WANG Yu^{2)*}, ZHANG Gui¹⁾, HE Rao-sheng¹⁾, DAI Xu-sheng¹⁾,
KANG Xiao-bo¹⁾, LAN Fu-ning³⁾

1) Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216;

2) Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051;

3) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004

Abstract: The Luxi karst fault-depression basin in Yunnan is rich in water resources, but the distribution of water resources is extremely uneven in time and space, and the utilization rate of water resources is low. The topography of the basin is characterized by obvious horizontal division and clear vertical classification. And the basin-bottom sedimentary flat dam area is the benchmark for local upper drainage in the Nanpan River basin. The remaining and restored wetland has the function of regulating and purifying water, and its elevation is close to the water supply demand zone. Therefore, analyzing and constructing a water resource recycling plan for the joint

本文由国家重点研发计划项目“断陷盆地地表、地下水资源高效利用与优化调控”(编号: 2016YFC0502502)资助。

收稿日期: 2020-06-08; 改回日期: 2020-08-23; 网络首发日期: 2020-09-08。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 张华, 男, 1982 年生。高级工程师。主要从事水文、工程、环境地质调查研究。通讯地址: 650216, 云南省昆明市人民东路王大桥云南省地质环境监测院。E-mail: ynddysghs.zhh@163.com。

*通讯作者: 王宇, 男, 1960 年生。博士, 教授级高工。主要从事水工环地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

dispatch of surface water and groundwater can effectively improve the utilization rate of water resources. By studying the geological environment conditions and water circulation system of the typical karst fault-depression basin in Luxi, researchers can find out the occurrence of water resources, the amount of exploitable resources, and the current status of development and utilization. Guided by earth system science, applying such methods as system analysis, hydrology and hydrogeological analysis and evaluation, and combined with the restoration, reconstruction and conservation of the Huangcaozhou and Pinghaizi wetlands, the authors propose a plan for the recycling of water resources in the karst fault-depression basin. The first is the restoration, reconstruction and conservation of the Huangcaozhou wetland ecology, using physical, biological, and chemical measures for water treatment and purification, pumping water for production, and agricultural irrigation recycling, forming an ecological restoration project—resource recycling plan; the second is to use the Gongnong tunnel to adjust and store the uneven waterlogging in time and space, drawn from the Pinghaizi reservoir, for irrigation in the dry season and power generation in the rainy season, thus effectively improving the level of water recycling in the karst fault-depression basin. There are many karst fault-depression basins in Yunnan, and hence wetlands or purification ponds can be built in the lower reaches of the basin to treat domestic sewage and surface water, pump and transport water, and use tunnels to divert and store waterlogging for drought relief, so as to solve the problem of uneven water resource utilization in time and space. This plan has strong operability and good prospects for popularization and application in fault-depression basins.

Key words: karst fault-depression basin; water resources system; water recycling; ecological hydrogeology; Luxi, Yunnan Province

岩溶断陷盆主要发育于滇东、滇西、攀西和黔西岩溶高原上,因其自然资源和环境条件相对较好,多为当地政治、经济和文化中心,耕地集中,人口密集,社会经济发展水平较高,对水资源的需求量大(王宇等,2003)。岩溶断陷盆地多处在亚热带高原季风气候区,降水量较大,天然水资源丰富(曹东福,2014),但旱雨季分明,加之岩溶高原强烈隆升,江河深切,导致水资源时空分布极为不均。高原面上的断陷盆地区与深切河谷排泄基准高差常达数百至千米以上,降水形成的地表径流和地下水漏失快,形成了严重的水土不配套现象。在时间分配上,表现出夏涝春旱、秋冬少雨的困局。2009年秋冬至2010年春夏,西南岩溶区遭受到百年不遇的严重旱灾,2011年至2013年、2018年至2020年也不同程度地出现较严重干旱,岩溶高原地区旱情尤为突出,对人民群众的生产生活影响特别严重。水资源是人类生活、生产及生态环境建设必需的资源(卢耀如,2014),量水而行已成为国土空间规划的基本原则。提高水资源利用水平(李旭尧等,2020),解决水资源供需矛盾,是水资源研究中的一个重点与热点问题(伍文琪等,2018)。岩溶断陷盆地地表、地下水资源丰富,把地表、地下水资源统筹考虑建立水循环利用方案,是缓和水资源时空分布不均匀,提高水资源利用率的有效途径之一。20世纪90年初,王宇(1990)通过水资源系统构建和数学模型求解建立了利用滇池调节进行部分循环利用的昆明市地表水-地下水联合调度方案。有关的研究还有不少,如鲁中南岩溶区是中国北方半干旱温带岩溶区,该区地

表水和地下水的合理调蓄问题也做过系统的分析和总结,并提出了相关的对策(贺可强等,2002)。塔里木河流域利用模糊综合决策、层次分析法等理论初步对该流域的水资源进行了配置研究,得出了不同保证率下水资源配置方案成果(任加锐等,2006)。本文拟通过研究泸西典型岩溶断陷盆地流域的地质环境条件与水循环系统,结合黄草洲、平海子湿地生态的恢复重建和涵养,提出岩溶断陷盆地水资源的循环利用方案,以期为提高岩溶断陷盆地的水资源利用提供可借鉴、可推广的案例。

1 概况

泸西岩溶断陷盆地流域地处滇东南高原边缘斜坡地带(图1),地理坐标为E: 103°30′—104°05′, N: 24°10′—24°45′,总面积达1 009.28 km²。盆地底部呈北东向展布,总体地势东高西低,北高南低。东部、南部高原面保存较好,发育峰丛洼地,山地海拔2000~2200 m,最高点老佐坟箐2 459.3 m;西部山地海拔1800~2000 m。盆地东南部的小江切割极为强烈,河谷呈“V”字形,切割深度500~1639 m。气候类型属亚热带高原季风气候,枯雨季分明,垂直差异显著,表现为高山寒、山区凉、坝区暖、河谷热的立体气候。大部分地区年降水量在1050~1100 mm。

根据《2017年泸西统计年鉴》,流域范围内盆地底部的县城驻地中枢镇人口12.49万人,人口密度约1750人/km²,农村经济总收入23亿元,农业生产总值8.74亿元,农产品工业加工总产值6.01亿元;

溶蚀丘峰谷区的白水镇人口 5.76 万人, 人口密度约 245 人/km², 农村经济总收入 8.82 亿元; 侵溶蚀山区的三塘乡人口 2.6 万人, 人口密度约 120 人/km², 农村总收入 2.13 亿元; 溶蚀河谷区的永宁乡、东山乡人口 4.7 万人, 农村经济总收入 4.6 亿元。通过人口分布和经济指标统计分析, 盆地作为行政驻地是人口集中区、农业活动集中区、工业活动区、GDP 主产区。

泸西岩溶断陷盆地以地块断陷为主导, 侵蚀及溶蚀共同作用形成的, 由里到外不同成因和组合形态的地貌呈现环带状的分布特征, 总体地势由低平递增至高耸, 地形切割由浅到深, 地貌分布和变化规律性明显(图 2)。岩溶断陷盆地下游河谷, 在高原斜坡地带为深切峡谷, 在高原面上多为浅切割峡谷和宽谷。由于下游河谷与岩溶断陷盆地相伴形成及同步演化, 是盆地的第一级侵溶蚀基准和径流排泄基准, 为了保持盆地物质和能量传输系统的完整性(袁道先等, 2002), 故将下游与盆地关联紧密的河段纳入岩溶断陷盆地环境地质分区。根据泸西岩溶断陷盆地地貌形态-成因类型的区间差异及变化规律, 由外围到中心区将盆地划分为: 侵溶蚀山区、溶蚀丘峰谷区、沉积平坝区、侵溶蚀河谷区 4 个环境地质分区(王宇等, 2017)(图 1)。侵溶蚀山区平均高程 2 140.16 m, 起伏度平均 441.16 m, 面积 356.24 km²; 溶蚀丘峰谷区平均高程 1 885.17 m, 平

均起伏度 186.17 m, 面积 212.4 km²; 沉积平坝区平均高程 1705 m, 起伏度平均 12 m, 面积 71.17 km²; 侵溶蚀河谷区平均高程 1154.67 m, 起伏度平均 779 m, 面积 369.47 km²。泸西岩溶断陷盆地流域属华南褶皱系滇东南褶皱带, 构造以北东和北东东向的断裂和褶皱为主。主要发育雨龙断裂、白水向斜、杨梅山背斜。构造控制了盆地地貌特征及地下水的分布, 是北东向暗河管道形成的主控因素, 通常沿断裂走向出露泉点, 发育串珠状的洼地、落水洞及溶洞等。出露地层以中生界三叠系为主, 局部地段分布古生界二叠系、新生界下第三系地层。坝区、河谷区及山区洼地内分布有新生界第四系红黏土、砂质黏土、细砂、砂砾, 一般厚度 0~30 m。古生界地层仅出露二叠系中统宣威组(P_{2x})泥岩、砂页岩、粉砂岩, 出露于流域北部杨梅山附近。中生界三叠系上统鸟格组(T_{3n})、火把冲组(T_{3h})为砂泥岩, 主要出露于流域西部的白泥山梁子, 西南部的永宁—东山河谷区; 中统个旧组(T_{2g})、法郎组(T_{2f})以灰岩、白云岩为主夹少量薄层泥质灰岩、砂泥岩, 个旧组在整个流域内分布较为广泛, 法郎组则集中分布在流域西部的白泥山梁子, 小江河下游深切河谷区; 下统飞仙关组(T_{1f})为砂泥岩, 分布在流域北部杨梅山, 永宁镇组(T_{1y})为薄层灰岩夹砂泥岩, 分布在流域东北部。新生界古近系路美邑组(E_{1l})为砾岩, 分布在流域东北部的大直邑, 泸西盆地西部的鲁克、核桃沟, 东部的东华寺等地段。

研究区内碳酸盐岩类岩溶含水层组依据各组段岩性及其组合关系划分为纯碳酸盐岩含水层组、纯碳酸盐岩夹不纯碳酸盐岩含水层组、纯碳酸盐岩夹

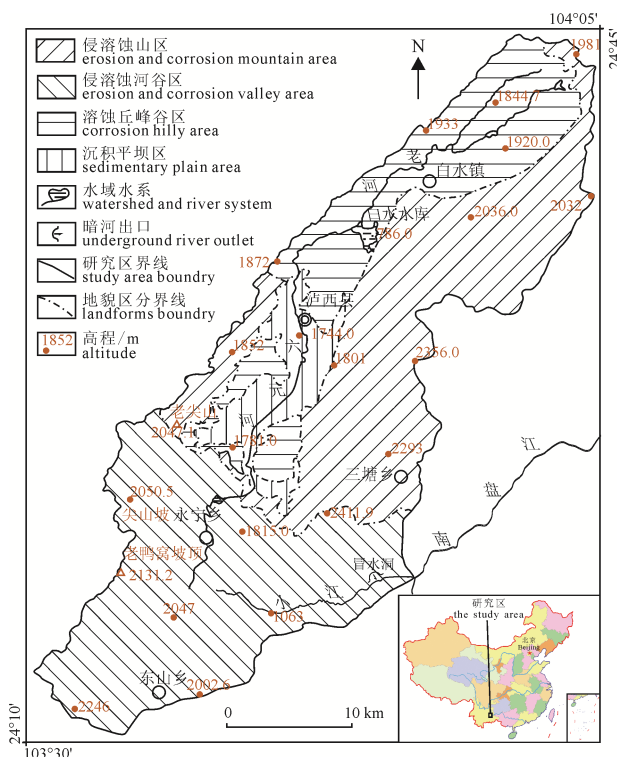


图 1 泸西岩溶断陷盆地流域地貌分区图

Fig. 1 Geomorphology zoning map of the watershed of Luxi karst fault-depression basin

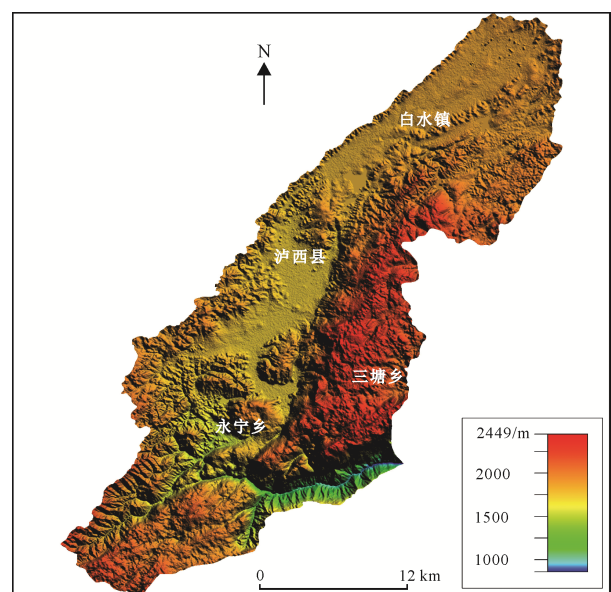


图 2 泸西岩溶断陷盆地流域三维高程模型图

Fig. 2 Three-dimensional elevation model map of the Watershed of Luxi karst fault-depression basin

碎屑岩含水层组三种类型。含水层组为三叠系下统永宁镇组下段(T_{1y}^a)、三迭系中统个旧组各段(T_2g^a 、 T_2g^b 、 T_2g^c 、 T_2g^d 、 T_2g^e)、法朗组下段(T_2f)及老第三系始新统路美邑组(E_2l)。含水层组呈片状、块状、条带状广泛出露于整个流域,出露总面积 610.04 km^2 。含水岩组的基本岩性为纯碳酸盐岩(灰岩类、白云岩类)、不纯碳酸盐岩(泥质灰岩、硅质灰岩)和碎屑岩。泸西岩溶断陷盆地流域是一个具有完整的补给、径流、排泄过程的岩溶水系统,其补给、径流、排泄的总体趋势为,地下水在侵溶蚀山区接受大气降水入渗补给,向溶蚀丘峰谷地区、盆底沉积平坝区径流,最终向最低排泄基准面——小江河谷排泄(图 3)。泸西岩溶断陷盆地岩溶较为发育,第一个是泸西盆地外围侵溶蚀山区,属裸露型岩溶区,地表岩溶形态主要表现为侵蚀、溶蚀石峰、洼地、谷地等岩溶地貌;第二个是溶蚀丘峰谷区,主要表现为溶丘台地槽谷区和岩溶峰丛洼地区;第三

个是沉积平坝区属覆盖型岩溶区,地表岩溶形态主要为零星的岩溶残丘,形态低矮,与平坝相对高度一般小于 20 m ; 第四个为侵溶蚀河谷区,属裸露型岩溶区,岩溶形态多样,组合类型齐全,岩溶发育强烈但极不均匀,地表地下岩溶孔隙多通过溶洞、漏斗、落水洞、溶隙等贯通,形成强大的岩溶洞、管、隙的连通网络,该区溶洞管道主要发育有 2 条,一条是冒水洞暗河通道,另一条是永宁暗河通道。

2 地表-地下水文系统、水流过程及水资源形成

流域内地表西大河纵贯全区,其支流多分布在中西部的谷地、盆地区,水库则多集中于岩溶缓丘台地槽谷区。小江河为南盘江左岸一级支流,干流全长 97.5 km ,积水面积 869.5 km^2 ,天然落差 1001 m ,河床平均纵坡 1.03% ,干流段河谷深切,

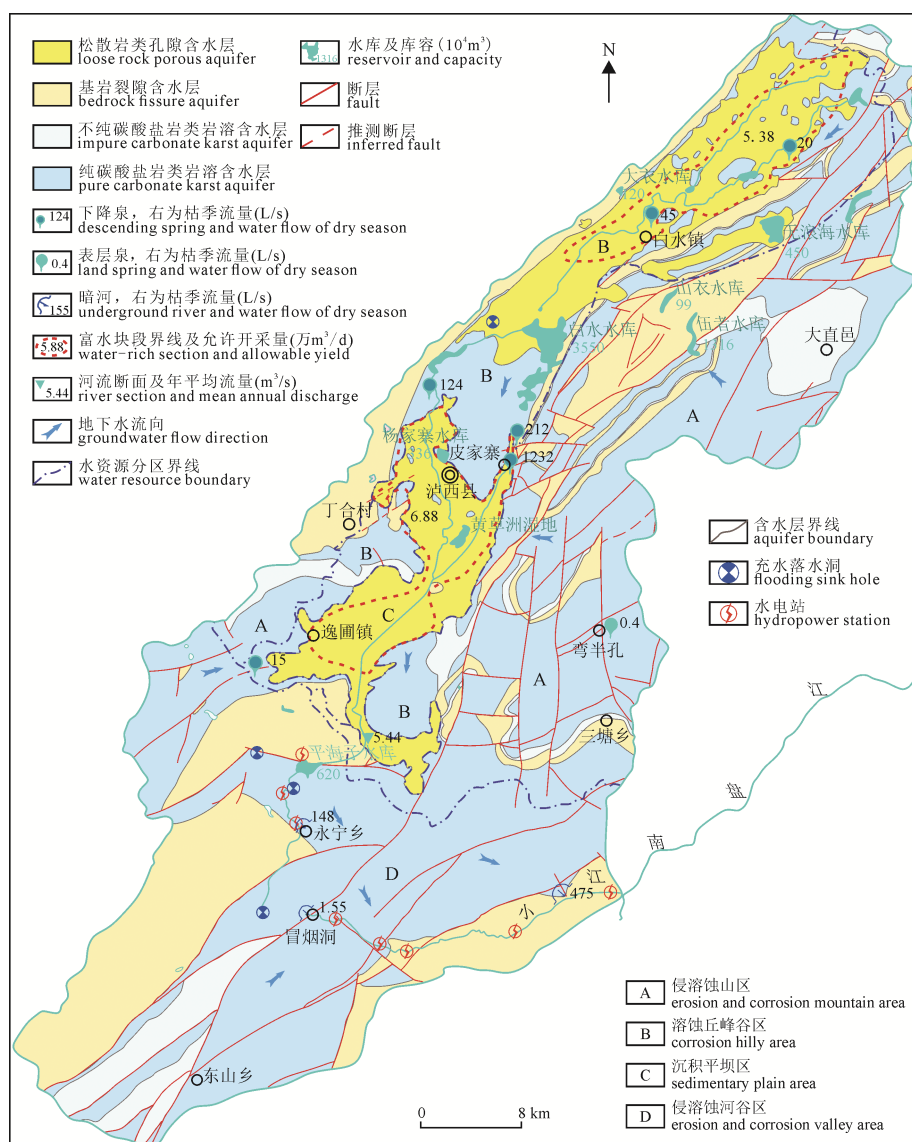


图 3 泸西岩溶断陷盆地流域水文地质图

Fig. 3 Hydrogeological map of the watershed of Luxi karst fault-depression basin

河床纵坡 2.62%。常年不断流, 丰水期为 6—8 月, 平水期为 11 月至次年的 1 月, 枯水期为 2—5 月。据下游工农隧洞水文站资料显示, 小江河水流量动态变化大, 最大流量 $39.83 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小流量为 $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$, 年平均流量 $5.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上游益谷坝多年平均径流量 4933 万 m^3 ($1.56 \text{ m}^3/\text{s}$)。小江河为大气降水补给, 发源于师宗县色从大山西麓的小沙湾村, 地貌为溶蚀丘峰谷区, 海拔 1 921 m, 向西南流约 9 km 进入泸西境的大无浪水库, 再右汇宜乐白支流, 入白水坝子, 叫益谷河, 左汇五者小河经益谷坝水文站、老干洞水库, 通过小段伏流, 进中枢坝子叫西大河, 又左汇支流东河过工农隧洞, 入平海子水库, 在石老虎处伏流约 2.6 km 进入永宁河谷, 在冒烟洞处再伏流约 2.4 km, 折向东流, 最后于三塘乡的布德隆村附近注入南盘江, 出口基准面 920 m。

泸西岩溶断陷盆地流域地下水系统是一个具有完整的补给、径流、排泄过程的岩溶水系统, 盆地外围侵溶蚀山区是流域地表水产流区和地下水主要补给区, 溶蚀丘峰谷区是地下水主要径流区, 泸西盆地沉积平坝区, 其水文地质功能为排泄、径流, 侵溶蚀河谷区是地下水排泄区。小江冒水洞暗河(13号), 历史流量 1100~1400 L/s, 2003 年 9 月 25 日偶测流量 623.21 L/s, 2018 年 5 月 22 日偶测流量 1290.1 L/s, 2019 年 5 月 13 日偶测流量 1161.4 L/s。

泸西岩溶断陷盆地流域地表、地下水转化频繁, 地表水补径排特征主要以小江河径流过程体现, 地下水在接受大气降水补给后, 上层径流以泉、暗河的形式以泸西盆地底面为排泄基准排泄而转化成地表水, 最终汇集于盆地南部通过工农隧洞及落水洞排向小江; 下层径流则以小江水面为基准而通过深层径流排泄。泸西岩溶断陷盆地流域径流系统分布见图 4。

3 可利用水资源开发利用现状和需水量分析

3.1 水资源总量特征

泸西岩溶断陷盆地流域地处南盘江西部分岩溶地区, 雨量充沛, 地表水、地下水较为丰富。地表水面主要为河流和水库, 河流为小江河。水库共有 25 座, 主要有白水塘、五者 2 个中型水库, 平海子、无浪海、山衣、大衣、杨家寨 5 个小(一)型水库, 及凹部山、烟光哨、纸厂、资舍等 19 个小(二型)水库, 总库容 8425 万 m^3 。坝塘有知府塘、黄草洲、小雨龙、水箐庙后坝塘等 194 个, 水面都较小, 总库容 281 万 m^3 ; 地下水以岩溶水为主, 天然出露冒水洞暗河(13号)等 4 条, 伏流 2 条, 天然出露皮家寨大泉(80 号)等岩溶大泉 120 个, 及李子箐、弯半孔等表

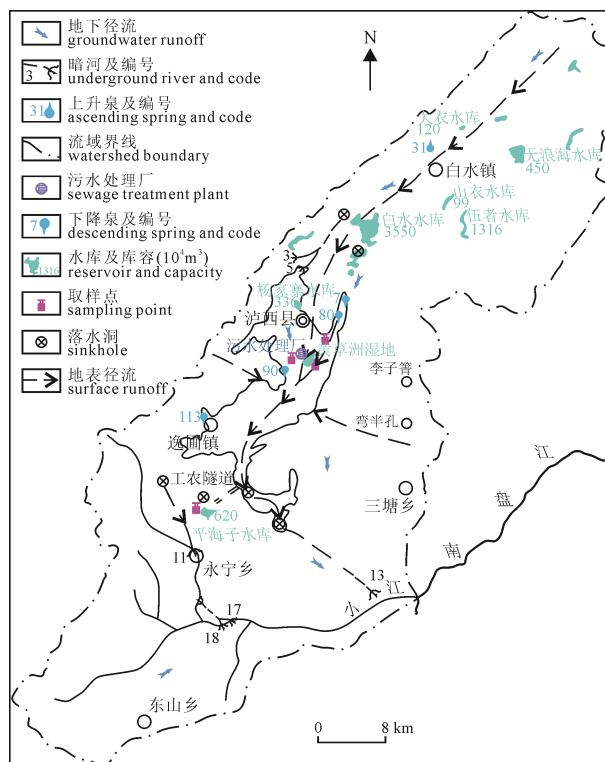


图 4 泸西岩溶断陷盆地流域径流系统分布图
Fig. 4 Runoff system distribution map of Luxi karst fault-depression basin

层泉 27 个。隐伏岩溶水源地有饱水带富水块段 2 个、表层带富水块段 2 个, 总允许开采量 43.91 万 m^3/d , 其中岩溶泉及暗河允许开采量约占 70%(王宇等, 2005a)。水资源量在时间上和空间上分布不均, 研究区旱涝灾害频繁, 内涝主要发生在溶蚀丘峰谷区和盆地沉积平坝区, 90 年代以来的旱灾发生频率约 2.8 年一次, 涝灾发生频率约 1.5 年一次, 与 80 年代相比, 90 年代以来的旱灾发生频率增长了 7.5%, 洪涝灾害的发生频率增长了 49%。泸西盆地的南东部挨来村一带, 1970 年工农隧洞竣工投入使用, 使泸西盆地内涝等到了极大的缓解。

3.2 水资源需水量

研究区泸西岩溶断陷盆地流域总供水能力为 $76.53 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, 需水量为 $173.03 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, 故缺水总量为 $96.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。其中, 盆地外围侵溶蚀山区缺水 $1.88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, 主要为生产用水和人畜饮水困难, 约有 4.3 万人, 1.5 万头牲畜缺水; 溶蚀丘峰谷区缺水 $59.18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, 生产生活用水、工业用水基本得到解决; 主要缺水为农业灌溉用水及生活饮用水, 约 0.47 万人饮水困难; 盆底沉积平坝区缺水 $35.26 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, 主要缺水为灌溉用水和生活饮用水, 工业用水基本可以解决; 小江侵溶蚀河谷区水资源供需基本平衡, 但由于水资源分布不均, 加之开发利用难度大, 仍存在灌溉缺水和农村饮用水困难的问题, 约 0.12 万亩农田灌溉及 0.4 万人生活饮用水

困难未能解决。

3.3 水资源开发利用方式及现状

泸西岩溶断陷盆地流域地表水的开发主要为修建水库、水窖及外盆地调水,地下水的开发方式主要为大泉壅水(王宇,2008)、泉水建池蓄水管引或提引、表层泉以池和管调蓄(彭淑惠和李继红,2006;蒋忠诚等,2006)、暗河以天窗提水等方式(王宇等,2005b)。主城区主要是引外流域板桥水库经自来水厂供城市生产生活用水。地下水的开发利用根据岩溶断陷盆地地貌形态-成因类型的区间差异及变化规律、水资源开发条件而方法不同。

侵蚀山区为地表水产流区、地下水补给区,地表水多采用水窖、水池、坝塘、小水库蓄水利用;地下水出露岩溶泉及表层泉共 50 个,枯季总流量为 15 625 m³/d,已开发利用的泉点有 29 个,开采量约 8000 m³/d,占泉水自流总量的 51.2%,主要是在泉口扩坑或在泉的下游修建蓄水池积蓄,大部分供村民生活及牲畜饮用,少部分用于旱季灌溉保苗。

溶蚀丘峰谷区为地表水及地下水径流区,建设中小型水库较多;地下水资源丰富,出露有 38 个岩溶泉,枯季总流量为 17 807 m³/d,已开发利用的泉点有 24 个,开采量约 6300 m³/d,占泉水自流总量的 35.4%。开发方式以在泉边建蓄水池或引流为主,主要用于灌溉,部分作为人畜饮用水。机井和民井开采量约 1200 m³/d,供旱季农业灌溉和平时生活用水。由于区内耕地面积较大,供水量远远不能满足用水需求。出露两个暗河出口和两个伏流出口,总流量达 46 726 m³/d,仅将部分暗河水用水渠引走作为灌溉用水,开采量约 4500 m³/d,利用率不足 10%。

沉积平坝区地表水及地下水汇集的上层排泄区。大部分山区地表和地下水汇集到该区,地表水系发育,主干河流有长流水,低洼处常积水成湖或发育湿地,地下水出露岩溶泉 16 个,枯季总流量达 168 257 m³/d,已开发利用的泉点 14 个,开采量约 7000 m³/d,占总流量的 4.2%。开发利用方式以引流灌溉为主,部分作为村民的生产生活用水。机井和民井较多,开采量约 5000 m³/d,主要用于旱季灌溉

用水和平时生产生活用水。

侵蚀河谷区地表水及地下水集中径流及排泄区。上游地表和地下水通过落水洞进入陡降的集中管道,在谷底部以暗河出口形式排泄,以快速集中管道流为主,水质普遍受到污染。河流水量大、势能强,常建有水力发电站。出露的岩溶泉总数为 14 个,枯季总流量达 3160 m³/d,已开发利用的泉点 12 个,开采量为 1600 m³/d,占泉水总流量的 50.6%,开发方式主要是建池、引流,作为灌溉用水和生活饮用水。区内出露较大的暗河有 4 条,均已建库调蓄发电。开采机井 11 眼,主要集中在永宁乡,开采量约为 1000 m³/d,主要供永宁乡城区的生产生活用水。

3.4 水系统结构

根据水资源结构类型泸西岩溶断陷盆地可分为地表水、地下水和需水 3 个一级子系统,地表水子系统细分为水库、河流、水厂等二级子系统,地下水子系统细分为大泉、暗河、泉水、机井、富水块段等二级子系统,需水子系统细分为农业、工业、生活、生态、蒸发等二级子系统。水系统组成结构见图 5。

3.5 水质评价

根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)进行单项水质评价。评价断面位置分别为:一是寺门前地表河(入黄草洲地表河段);二是黄草洲湿地旁的城市生活污水处理厂排水;三是黄草洲湿地出口;四是平海子水库(见表 1)。

通过单项评价水质分析得出,4 组水样超标项有高锰酸盐指数、溶解氧、氨氮、总磷、总氮、汞、粪类大肠菌群。黄草洲入口(寺门前地表河段)水质超过Ⅲ类的项有高锰酸盐指数(Ⅳ,超标 0.02 倍)、氨氮(Ⅴ类,超标 0.54 倍)、总氮(Ⅴ类,超标 5.81 倍);黄草洲湿地旁的城市生活污水处理厂排水水质超过Ⅲ类的项有溶解氧(Ⅳ,超标 0.4 倍)、总磷(Ⅴ类,超标 3.55 倍)、总氮(Ⅴ类,超标 10.23 倍)、粪类大肠菌群(Ⅴ类,超标 1.38 倍);黄草洲湿地出口水质超过Ⅲ类的项总氮(Ⅳ类,超标 0.11 倍)、汞(Ⅳ类,超

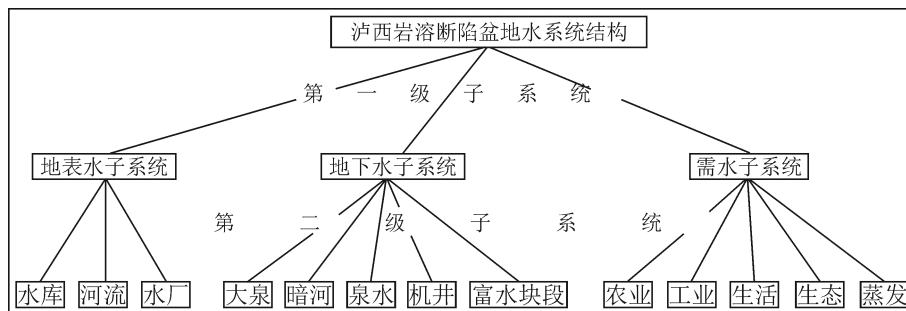


图 5 泸西岩溶断陷盆地水系统结构图

Fig. 5 Water system structure diagram of Luxi karst fault-depression basin[0]

表 1 水质取样分析表
Table 1 Water quality sampling analysis table

分析项	单位	取样地点			
		黄草洲入口 (寺门前地表河段)	城市生活污水 处理厂排水	黄草洲湿地出口	平海子水库
pH 值		6.0	6.1	6.1	6.2
溶解氧(DO)		3.19	2.94	3.37	4.19
高锰酸盐指数		6.16	5.08	2.31	4.93
化学需氧量(COD)		6.35	11.11	12.70	14.28
五日生化需氧量(BOD ₅)		0.89	0.77	1.82	1.02
氨氮(NH ₃ -N)		1.54	0.24	0.45	0.51
总磷(TP)		0.06	0.91	0.05	0.16
总氮(TN)		6.81	11.23	1.11	5.25
铜(Cu)		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
锌(Zn)		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
氟化物(F ⁻)	mg/L	0.12	0.28	0.20	0.24
硒(Se)		<0.000 4	<0.000 4	<0.000 4	0.000 5
砷(As)		0.003	0.006	0.005	0.003
汞(Hg)		<0.000 05	0.000 08	0.000 12	0.000 18
镉(Cd)		<0.000 2	<0.000 2	<0.000 2	<0.000 2
铬(Cr ⁶⁺)		<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
铅(Pb)		<0.000 5	<0.000 5	<0.000 5	<0.000 5
氰化物		<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
挥发酚类		<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
阴离子表面活性剂(DBS)		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
硫化物		<0.005	0.020	<0.005	<0.005
石油类		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
粪大肠菌群	个/L	2300	23 800	2300	23 800

注: 测试单位为云南地质工程勘察设计院。

标 0.2 倍); 平海子水库水质超过Ⅲ类的项有总氮(V 类, 超标 4.25 倍)、汞(Ⅳ类, 超标 0.8 倍); 粪类大肠菌群(V 类, 超标 1.3 倍)。地表水体总体水质较好, 而城市生活污水处理后的排放水超标项仍比地表水超标项多, 且氮、磷超标倍数也比地表水超标倍数大。

4 水资源循环利用对策及比对方案

泸西岩溶断陷盆地流域, 地形切割大, 切割深度 500 ~ 1639 m。水资源需求在盆地(楼上); 排泄区在河谷(楼下), 地表-地下水交换频繁, 大部分地表水迅速补给地下水(章程, 2000; 潘晓东等, 2015), 地下水流动速度快, 于深切河谷作深远程径流排泄(王宇, 2018), 排泄基准面的小江河谷及冒水洞, 地下水资源都极其丰富, 如果从排泄基准面提水, 工程巨大、工程建设成本高, 利用水资源的代价也高。泸西岩溶断陷盆地水资源量时空上分布不均, 受降雨控制明显, 作为以农业为主要经济支撑的县, 水资源的保障程度尤为重要, 因此, 充分利用盆地水资源, 就需要对水资源进行循环利用, 提高资源保障程度。

4.1 时间错位的水资源调蓄循环利用

4.1.1 工农隧道排涝与耕地保障

泸西岩溶断陷盆地内涝严重, 据《广西府志》

记载“上淹城堡, 下吞村落; 庄稼毁没, 房屋倒塌”, 公元 1602 至公元 1970, 有记载发生特大内涝五十余次, 内涝淹没至县城边的文庙附近。1970 年工农隧道竣工投入使用, 使泸西盆地内涝等到了极大的缓解。只有特大暴雨时挨来一带有局部淹没, 面积 1~3 km², 且现在对落水洞进行清淤、地表排水渠道工程通畅, 内涝发生几率下降, 大量的耕地得以保障生产。

4.1.2 地下水位抬升、地表水库调蓄

工农隧道排涝不仅解决了盆地的内涝而且为平海子水库提供了水源, 水库工程的建设也有力地减轻了自然灾害的危害(卢耀如等, 2015)。将雨季丰足的水资源储存在地表水库中, 通过水库调蓄, 用于枯季下游灌溉。且水库库容区地下水位抬升高度 1 ~ 5 m, 水库库容量有保障, 最少库容量 620 万 m³, 水库周边的植被能更好地吸收地下水资源, 生态环境、植被生长形态旺盛, 次生植物也将得到好的生长。水库调蓄作用明显。

4.1.3 污水处理、改善水质

通过取样分析, 部分项目超标, 需进行水质处理。水质处理场地根据断陷盆地天然的优势及地貌类型, 一级处理分布在盆地底部, 包括城市生活污

水处理和黄草洲湿地净化处理;二级处理分布在下游的平海子水库(见图6)。

一级城市生活污水处理。将泸西县主城区生活污水中的溶解氧、总磷、总氮、粪类大肠菌群等超标项进行物化、化学处理的主要措施(范瑞雪, 2011; 赵昕, 2012)和水体恶臭进行生物方法除臭处理的辅助措施(李倩和张明, 2013), 目前处理后汇入西大河 1.01 万 m^3/d , 供下游灌溉。

一级黄草洲湿地净化。湿地是珍贵的自然资源, 也是重要的生态系统, 具有不可替代的综合功能(王凯霖等, 2018), 云南泸西黄草洲国家湿地公园有河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、人工湿地等 4 个湿地类(苏博, 2018)。黄草洲湿地汇集了来自盆地东北部的分布地表水和自身出露的地下水, 利用自然环境的净化作用来净化污水(王琰, 2014), 水质得到了明显的改善, 通过物理、生物措施为主, 再结合

化学措施处理氮、汞项超标项。湿地净化出口排泄量为 7.48 万 m^3/d , 通过地表河沟汇入西大河。

二级的平海子水库净化。平海子水库为人工建库蓄水, 库容量 620 万 m^3 , 平海水库汇集了泸西盆地部分地表河, 通过工农隧道进入平海子水库, 旱季供灌溉、雨季供发电。通过采取物理、生物及化学措施(周福兰, 2019), 将超标项总氮、汞、粪类大肠菌群进行处理, 同时保护周围生态环境, 增强生态环境自身净化能力(成功和朱战军, 2012)。从而水质得到更好的改善。

4.1.4 水资源循环利用方案

黄草洲湿地目前面积 2.5 km^2 , 旱季湿地净化出口排泄量为 7.48 万 m^3/d , 湿地规模和净化能力有限。黄草洲湿地生态的恢复重建和涵养工程主要包括: 湿地面积结合水源分布, 面积扩大 4 倍, 达 10 km^2 , 将整个湿地公园作为生态保护区, 水生植

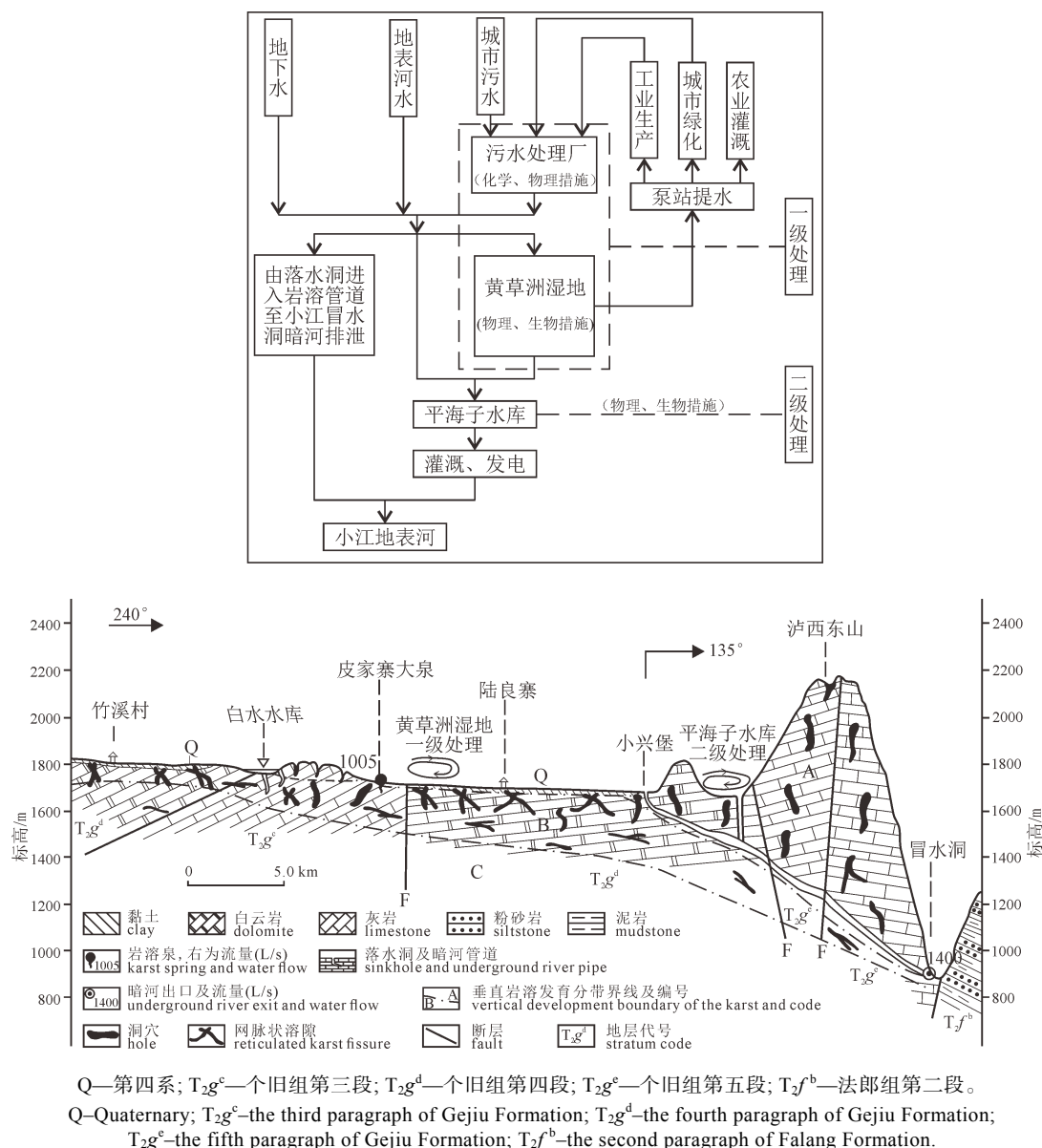


图6 岩溶断陷盆地水资源利用与水处理模式图

Fig. 6 Diagram of water resources utilization and treatment mode in karst fault-depression basin

被按自然沼泽湿地配置，选用本地物种进行植被重建及引入，构建复杂多样的湿地植被群落结构，形成沉水植物、浮水植物、挺水植物等一系列完善的植被演替类型(李莹, 2013); 陆生植被选择合理搭配湖滩植物，以草本为主，以灌木为辅，并点植湿生乔木，构建草本植物群落和疏林灌丛群落，增强植被过滤净化功能; 山地植被恢复在边坡采用挂网喷播复绿，在山体种植乔木、灌木、草本不同混交模式的多物种、多样林分类型植物种植选用当地典型的自然植被群落为主，因地制宜、适地适树的原则，形成具有多层次和多功能的落叶阔叶林和针阔混交林的镶嵌体山地湿地景观(薛彦新, 2016)。

平海子水库目前径流面积 3.5 km²，坝高 11.3 m，库容量 620 万 m³，扩建坝高至 15 m，增加库容量达 800 万 m³。平海子水库生态的恢复重建和涵养，一是在径流区的石漠化区、矿山区进行植被恢复治理，利用生态水文地质学研究地下水与陆生植被生态间相互作用(万力等, 2005)，通过植被营造绿色防护林、植被生态系统呈多样性与稳定性发展，达到植被动物群落的动态平衡(吴次芳等, 2019)，采取岩溶生态重建措施(韦复才和周游游, 2005)，增加植被覆盖率，提高土壤涵养水源能力(张华等, 2011)。二是在径流主河道和水域面种植选用本地物种进行植被重建及引入，构建复杂多样的湿地植被群落结构，形成沉水植物、浮水植物、挺水植物等。

现状下的黄草洲湿地一级处理，未纳入城市生活污水处理厂的排水，因水质不达标，需提升污水厂的水处理能力及技术方法。通过岩溶断陷盆地的地形地貌及水资源的研究分析，利用泸西岩溶断陷盆地天然的储水构造将地表水、地下水及污水处理厂处理后排水引入到黄草洲湿地，结合黄草洲天然湿地净化，采用物理、生物、化学措施进行水处理净化，达到地表水Ⅲ水质标准，泵站提水供应生产、农业灌溉循环利用水资源，形成生态恢复工程—资源循环利用的方案。将实现 7.48 万 m³/d 的水资源量循环利用，将提供盆地底部及外围山区旱季浇灌用水，缓解岩溶断陷盆地干旱缺水。

4.2 空间错位的水资源调控

泸西岩溶断陷盆地流域的水循环利用方案，一是小江河谷提水方案；二是黄草洲湿地生态恢复重

建和涵养方案。根据当地的经济社会调查和有关部门及单位的报告报表资料，结合泸西岩溶断陷盆地水资源循环利用工程方案构想进行估算。小江河谷提水方案，提水高程达 1400 m，需采用四级提水。工程运行费包括抽水电费及设备维护。黄草洲湿地生态恢复重建和涵养方案，主要是污水处理厂的建设及运行处理、黄草洲湿地生态恢复重建及水处理，黄草洲湿地生态恢复重建工程，提水工程的泵站和管材建设(见表 2)。因此，在工程建设及运行维护费的技术和经济上，黄草洲湿地生态恢复重建和涵养方案比小江河谷提水方案可行，资源利用水平高、效益好、成本低，经济效益可观。

5 展望

黄草洲湿地生态恢复重建、平海子水库生态恢复重建和涵养方案，不仅石漠化面积减少，也使植被覆盖率提高，植被涵养水源能力也大大提高。同时可种植经济林、经济作物治理石漠化，湿地、水库也为经济作物保苗、保花的水源，比种植玉米、烤烟等效益好。因此，生态恢复重建和涵养将使生态环境效益明显。

黄草洲湿地生态恢复重建、平海子水库生态恢复重建和涵养方案，将践行国家提出的绿水青山就是金山银山的发展理念，形成人与自然和谐发展的新格局，满足人民日益增长的优美生态环境的需求(何霄嘉等, 2019)。其核心是山水林田湖草共同体理念的具体实践。石漠化、矿山地貌景观得到改善，植林区空气负离子浓度将明显升高，环境舒适，黄草洲湿地公园、平海子水库生态区等也将提高泸西生态旅游品牌价值。因此，生态恢复重建和涵养将提升社会效益显著。

用泸西岩溶断陷盆地天然的储水构造将地表水、地下水及污水处理厂处理后排水引入到黄草洲湿地进行净化的方法经济且技术可行，生态环境和社会效益显著。云南岩溶断陷盆地众多，丽江、昭通、罗平、蒙自、建水等岩溶断陷盆地都可以在盆地下游建湿地或净化池，处理生活污水和地表水，提水输送、隧道引水调蓄内涝、抗旱，解决时空不均的水资源利用。该方案可操作性强，在断陷盆地推广运用前景好。

表 2 调水方案的效益对比表
Table 2 Comparison Table of Benefits of Water Transfer Scheme

提水方案	工程量	工程建设费	运行维护项	运行维护费	可行性分析
小江河谷提水方案	提水站4座，输水管材 口径600 mm，长30 km	5000万元	抽水电费及设备维护费	30元/m ³	技术难度大、成本 高、效益差
黄草洲湿地生态恢 复重建和涵养方案	污水处理厂建设费，提 水工程的泵站和管材	3700万元	污水处理、湿地水质处理、 提水站及管材的运行维护费	4元/m ³	资源利用水平高、 效益好、成本低

6 结论

(1) 泸西岩溶断陷盆水资源时空分布不均, 水资源利用率低。利用岩溶断陷盆地天然的储水地貌条件, 结合湿地生态恢复重建和涵养, 构建地表水-地下水联合调度的水资源循环利用方案, 可有效提高水资源的利用率, 黄草洲湿地水资源循环利用量 $7.48 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 平海子水库调蓄 620 万 m^3 。

(2) 利用盆地沉积平坝区及周边湿地(含水库、湖泊)调蓄, 采用物理化学及生物措施进行污水处理, 分别提供不同水质等级要求的供水量, 使径流在上层沉积平坝区的水资源量实现循环利用, 在经济技术上是可行的, 经济、社会、环境效益良好。

(3) 泸西岩溶断陷盆地典型性突出, 水资源系统及循环利用方案的设计思路、基本原理和形式, 对于岩溶高原断陷盆地具有广泛的参考和推广利用价值。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0502502).

参考文献:

- 曹东福. 2014. 云南省水资源开发利用变化趋势与生态环境问题研究[J]. 环境科学导刊, 33(2): 31-35.
- 成功, 朱战军. 2012. 滇池水环境污染成因及治理策略分析[J]. 环境科学与技术, 35(S2): 356-359, 377.
- 范瑞雪. 2011. 浅谈城市污水处理主要方法[J]. 广东建材, 27(3): 166-168.
- 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 2019. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. 生态学报, 39(18): 6577-6585.
- 贺可强, 刘炜金, 邵长飞. 2002. 鲁中南岩溶水资源综合类型及合理调蓄研究[J]. 地球学报, 23(4): 369-374.
- 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 裴建国, 何师意, 梁彬. 2006. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. 地球学报, 27(5): 495-502.
- 李倩, 张明. 2013. 城市污水处理厂恶臭气体的生物处理方法[J]. 安徽农学通报, 19(23): 64-65.
- 李旭尧, 邓艳, 曹建华, 蒋忠诚, 徐辉, 梁锦桃. 2020. 典型岩溶县生态承载力演变分析——以云南泸西为例[J/OL]. 中国岩溶: 1-17[2020-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.p.20200326.1050.002.html>.
- 李莹. 2013. 南阳白河滨水景观文化元素的整合与再生[D]. 郑州: 河南农业大学.
- 卢耀如, 刘琦, 张鑫馨. 2015. 贯彻科学生态文明理念以综合开发水资源防灾兴利[J]. 河海大学学报(自然科学版), 43(5): 384-394.
- 卢耀如. 2014. 建设生态文明保护地下水资源促进可持续开发利用(代序)[J]. 地球学报, 35(2): 129-130.
- 潘晓东, 梁杏, 唐建生, 苏春田, 孟小军. 2015. 黔东北高原斜坡地区 4 种岩溶地下水系统模式及特点——基于地貌和蓄水构造特征[J]. 地球学报, 36(1): 85-93.
- 彭淑惠, 李继红. 2006. 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, 25(2): 249-255.

- 任加锐, 唐德善, 洪娟, 刘小刚. 2006. 塔里木河流域水资源合理配置方案研究[J]. 人民黄河, 28(5): 40-42.
- 苏博. 2018. 云南泸西黄草洲国家湿地公园湿地生态系统调查与评价[J]. 陕西林业科技, 46(4): 47-53.
- 万力, 曹文炳, 胡伏生, 梁四海, 金晓娟. 2005. 生态水文学与生态水文地质学[J]. 地质通报, 24(8): 700-703.
- 王凯霖, 李海涛, 吴爱民, 李木子, 周艺, 李文鹏. 2018. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究[J]. 地球学报, 39(5): 549-558.
- 王琰. 2014. 城市污水处理的方法[J]. 科技传播, 6(11): 129, 128.
- 王宇, 李燕, 谭继中, 张贵, 何绕生. 2003. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明: 云南科技出版社: 1-2.
- 王宇, 袁道先, 杨世瑜. 2005b. 泸西小江流域岩溶水有效开发模式[J]. 中国岩溶, 24(4): 305-311.
- 王宇, 张贵, 李丽辉, 李继红, 吕爱华. 2005a. 泸西小江流域岩溶水开发与石漠化综合治理示范[R]. 昆明: 云南省地质调查院.
- 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 2017. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 36(3): 283-295.
- 王宇. 1990. 昆明市地表水与地下水联合调度系统研究[J]. 水资源研究, 11(4): 9-15.
- 王宇. 2008. 云南泸西皮家寨岩溶大泉束流调压壅水开发示范[J]. 中国岩溶, 27(1): 1-5, 18.
- 王宇. 2018. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 37(1): 1-8.
- 韦英才, 周游游. 2005. 西南岩溶区生态地质环境特点及生态恢复重建策略[J]. 中国岩溶, 24(4): 282-287.
- 吴次芳, 肖武, 曹宇, 方恺. 2019. 国土空间生态修复[M]. 北京: 地质出版社.
- 伍文琪, 罗贤, 黄玮, 李运刚. 2018. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 27(7): 1517-1524.
- 薛彦新. 2016. 云南泸西黄草洲国家湿地公园滨水空间设计研究[D]. 郑州: 河南农业大学.
- 袁道先, 刘再华, 林玉石, 沈继芳, 何师意, 徐胜友, 杨立铮, 李彬, 谭嘉铭, 蔡五田. 2002. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社: 1-2.
- 张华, 王宇, 柴金龙. 2011. 滇池流域石漠化特征分析[J]. 中国岩溶, 30(2): 181-186.
- 章程. 2000. 南方典型溶蚀丘陵系统现代岩溶作用强度研究[J]. 地球学报, 21(1): 86-91.
- 赵昕. 2012. 城市污水处理厂污水处理方法及运行期环境影响评价要点[J]. 黑龙江环境通报, 36(3): 15-19.
- 周福兰. 2019. 城市污水处理的常见方法、问题及策略分析[J]. 现代盐化工, 46(2): 72-73.

References:

- CAO Dong-fu. 2014. Trend of Water Resource Development and Ecological Environmental Problems in Yunnan[J]. Environmental Science Guide, 33(2): 31-35(in Chinese with English abstract).
- CHENG Gong, ZHU Zhan-jun. 2012. Causes of Dianchi water environment pollution and analysis of management strategy[J]. Environmental Science & Technology, 35(S2): 356-359, 377(in Chinese with English abstract).
- FAN Rui-xue. 2011. On the main methods of urban sewage treatment[J]. Guangdong Building Materials, 27(3): 166-168(in Chinese).
- HE Xiao-jia, WANG Lei, KE Bing, YUE Yue-min, WANG Ke-lin, CAO Jian-hua, XIONG Kang-ning. 2019. Progress on ecological conservation and restoration for China Karst[J]. Acta Ecologica

- Sinica, 39(18): 6577-6585(in Chinese with English abstract).
- HE Ke-qiang, LIU Wei-jin, SHAO Chang-fei. 2002. The Comprehensive Type Classification and Proper Adjustment of Karst Water Resource in the Central-South Region of Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 23(4): 369-374(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, XIA Ri-yuan, SHI Jian, PEI Jian-guo, HE Shi-yi, LIANG Bin. 2006. The Application Effects and Exploitation Capacity of Karst Underground Water Resources in Southwest China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(5): 495-502 (in Chinese with English abstract).
- LI Qian, ZHANG Ming. 2013. Bioiocal Treatment Methods Odor in Urban Sewage Treatment Plants[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 19(23): 64-65(in Chinese with English abstract).
- LI Xu-yao, DENG Yan, CAO Jian-hua, JIANG Zhong-cheng, XU Ye, LIANG Jin-tao. 2020. Evolution analysis of ecological bearing capacity of typical karst counties:A case study of Luxi, Yunnan Province[J/OL]. Carsologica Sinica: 1-17[2020-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.p.20200326.1050.002.html>(in Chinese with English abstract).
- LI Ying. 2013. Integration and regeneration of Nanyang Baihe River waterfront landscape culture element[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University(in Chinese with English abstract).
- LU Yao-ru, LIU Qi, ZHANG Xin-xin. 2015. Implementation of concept of scientific ecological culture for comprehensive development of water resources and disaster prevention[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 43(5): 384-394(in Chinese with English abstract).
- LU Yao-ru. 2014. Build Ecological Civilization and Protect Groundwater Resources to Promote Sustainable Development and Utilization[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(2): 129-130(in Chinese with English abstract).
- PAN Xiao-dong, LIANG Xing, TANG Jian-sheng, SU Chun-tian, MENG Xiao-jun. 2015. The Patterns and Characteristics of Four Karst Groundwater Systems in Northeast Guizhou Slope Zone Based on the Landscape and Reservoir Structure[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(1): 85-93(in Chinese with English abstract).
- PENG Shu-hui, LI Ji-hong. 2006. The characteristics & development of epigenic karst water in esat Yunnan[J]. Yunnan Geology, 25(02): 249-255(in Chinese with English abstract).
- REN Jia-rui, TANG De-shan, HONG Juan, LIU Xiao-gang. 2006. Study on the reasonable allocation of water resources in the Tarim River Basin[J]. Yellow River, 28(5): 40-42(in Chinese).
- SU Bo. 2018. Investigation and Evaluation of Wetland Ecosystem in Huangcazhou Nationl Wetland Park in Luxi of Yunnan[J]. Shaanxi Forestry Science and Technology, 46(4): 47-53(in Chinese).
- WAN Li, CAO Wen-bing, HU Fu-sheng, LIANG Si-hai, JIN Xiao-mei. 2005. Eco-Hydrology and eco-Hydrogeology[J]. Geological Bulletin of China, 24(8): 700-703(in Chinese with English abstract).
- WANG Kai-lin, LI Hai-tao, WU Ai-min, LI Mu-zi, ZHOU Yi, LI Wen-peng. 2018. An Analysis of the Evolution of Baiyangdian Wetlands in Hebei Province with Artificial Recharge[J]. Acta Geoscientica Sinica 39(5): 549-558(in Chinese with English abstract).
- WANG Yan. 2014. Urban sewage treatment method[J]. Technology Communication, 6(11): 129, 128(in Chinese).
- WANG Yu, LI Yan, TAN Ji-zhong, ZHANG Gui, HE Rao-sheng. 2003. Storage Rule of Karst Water in Fault Basins[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Publishing House: 1-2(in Chinese).
- WANG Yu, YUAN Dao-xian, YANG Shi-yu. 2005b. Effective Exploitation Model of Karst Water in Xiaojiang Basin, Luxi County, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 24(4): 305-311(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, ZHANG Gui, LI Li-hui, LI Ji-hong, LÜ Ai-hua. 2005a. Demonstration of comprehensive treatment of karst water development and rocky desertification in the Xiaojiang River Basin in Luxi[R]. Kunming: Yunnan Geological Survey(in Chineset).
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shu-hui, HE Rao-sheng, ZHOU Cui-qiong. 2017. Zoning of environmental geology and functions in karst fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 36(3): 283-295(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu. 1990. Research on Joint Dispatching System of Surface Water and Groundwater in Kunming City[J]. Water Resources Research, 11(4): 9-15(in Chinese).
- WANG Yu. 2008. Water resource exploitation from big karst spring by flow narrowing-water pressure adjusting-water table raising—A case in Pijiazhai spring, Luxi county, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 27(1): 1-5, 18(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu. 2018. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. Carsologica Sinica, 37(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- WEI Fu-cai, ZHOU You-you. 2005. Geologic environm ental features and ecologic rehabil itation in southwest China karst areas[J]. Carsologica Sinica, 24(4): 282-287(in Chinese with English abstract).
- WU Ci-fang, XIAO Wu, CAO Yu, FANG Kai. 2019. Ecological restoration of territorial space[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WU Wen-qi, LUO Xian, HUANG Wei, LI Yun-gang. 2018. Research on the Water Resources Carrying Capacity and Its Temporal—Spatial Distribution Characteristics in Yunnan Province, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 27(7): 1517-1524(in Chinese with English abstract).
- XUE Yan-xin. 2016. Study on the design of Yunnan Luxi Huang Cao Zhou Nationl Wetland Park waterfront space[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian, LIU Zai-hua, LIN Yu-shi, SHEN Ji-fang, HE Shi-yi, XU Sheng-you, YANG Li-zheng, LI Bin, TAN Jia-ming, CAI Wu-tian. 2002. China's karst dynamic system[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-2(in Chinese).
- ZHANG Hua, WANG Yu, CHAI Jin-long. 2011. Analysis on the desert's characteristics in Dianchi watershed[J]. Carsologica Sinica, 30(2): 181-186(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng. 2000. A Study on Modern Karstification Intensity of Typical Corrosional Hill System in South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 21(1): 86-91(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xin. 2012. Main points on Environmental impact Assessment of sewage treatment processes and operation period sewage treatment plant[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 36(3): 15-19(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Fu-lan. 2019. Analysis on common methods、problems and strategies of urban sewage treatment[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 46(2): 72-73(in Chinese with English abstract).