

王波,张华,王宇,等. 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.  
DOI:10.11932/karst20200302

# 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

王波<sup>1</sup>,张华<sup>1</sup>,王宇<sup>2</sup>,张贵<sup>1</sup>,张文璿<sup>1</sup>,高瑜<sup>1</sup>,罗为群<sup>3</sup>

(1. 云南省地质环境监测院, 昆明 650216; 2. 云南省地质调查局, 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:**在详细调查基础上,采用系统科学及水文地质分析方法,依据地形地貌、地层岩性、地质构造、示踪试验、地下水排泄基准面、喀斯特发育条件及发育规律等剖析论证流域边界,并通过钻探及示踪试验进行验证。研究结果:(1)对泸西喀斯特断陷盆地南东部的水系统边界向北移进行了修正,证实了三塘一带深部不发育的喀斯特是地下水分水岭边界,使得泸西喀斯特断陷盆地流域的径流系统和边界圈化更加准确;(2)泸西喀斯特断陷盆地流域地表水、地下水转化频繁,地表水径流特征主要以小江河在水库、河流、伏流间的径流转化过程为体现,地下水在侵溶山区接受大气降水补给后,上层径流以泉、暗河的形式在泸西盆地底面排泄后转化成地表水,最终汇集于盆地南部、通过工农隧洞及落水洞排向小江,而下层径流则以小江水面为基准,通过深层径流排泄。

**关键词:**喀斯特断陷盆地;流域边界;地下水;地表水;水动力性质

**中图分类号:**P641.134 **文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2020)03-0319-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

流域边界及水动力性质是流域生态地质环境特征,水流形成、运动、储存特性的最重要决定因素。通过系统的调查论证,准确确定流域的边界及水动力性质,是径流系统模拟、水资源评价、寻找和开发利用地下水资源、开展资源与环境开发及保护规划、解决环境问题、进行生态修复与保护等工作的必要前提<sup>[1]</sup>。喀斯特流域由于地下洞、管、隙空隙发育,形成了地表、地下双层径流系统<sup>[2]</sup>,由于地质背景和地形地貌条件的变化,常导致喀斯特流域的地表水与地下水边界发生分异,产生地表水与地下水边界不一致的客观现象,但地表水与地下水相互转换频繁,

又是一个统一的径流过程,通过地形分水岭圈划确定流域边界的方法不能确切地反映喀斯特流域的实际情况,准确地评价水资源及环境条件,制订合理的开发与保护方案。因此,对于喀斯特流域不仅仅需要圈划地形分水岭,也必须确切圈划地下水流域边界,而由于地下水流域边界的隐蔽性、地质构造的复杂性、喀斯特发育的不均一性,准确圈定地下水流域边界始终是喀斯特水文地质研究的难题。除了少量大型地下水源地勘探开发区、重大水源地保护区、重大环境污染事件处置中通过大量的钻探观测、交互抽水、连通试验、示踪试验、地球物理和地球化学勘查较为准确地圈定了地下水流域边界外,一般的水文地质环境地质调查评价工作所划分的地下水流域

基金项目:国家重点研发计划项目课题“断陷盆地地表、地下水资源高效利用与优化调控”(2016YFC0502502);中国地质调查局项目“南方石漠化重点区综合地质调查与评价”(DD20190502)

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:张华(1982—),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:183810319@qq.com。

收稿日期:2019-07-19

边界主要还是沿地表分水岭、含水层与隔水层(带、体)的界线划分,多为不够精确的大致边界,边界的水动力性质主要是水文地质分析推断的结果<sup>[3]</sup>。本文通过详细调查、分析水文地质情况,初步圈划出泸西喀斯特断陷盆地地表水与地下水的流域边界,再通过钻探试验、示踪试验、地球物理探测对隐蔽而不确切的地段进行揭露和控制,以把流域边界、水系统边界修订得更加确切,同时查明流域边界的水动力性质,取得了基本的水文地质参数,以期为盆地流域地表水、地下水径流系统的模拟提供建模依据和定解条件。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理概况

泸西喀斯特断陷盆地流域地处滇东南高原边缘斜坡地带(图1),总面积达1 009.28 km<sup>2</sup>;盆地呈北东向展布,总体地势东高西低、北高南低,东部、南部高原面保存较好,分布有大量峰丛洼地,山地海拔在2 000~2 200 m,最高点老佐坟箐高2 459.3 m,西部山地海拔在1 800~2 000 m;盆地南东部的小江切割极为强烈,河谷呈“V”字形,切割深度为500~1 639 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;其大部分地区年降水量在1 050~1 100 mm。

### 1.2 地质背景

泸西喀斯特断陷盆地流域属华南褶皱系滇东南褶皱带,经历过多期构造运动,形成了多种不同类别和性质的断层、褶皱,断层走向以北东向为主,规模较大,其次为近南北向断层,构造控制了流域的地貌特征,泸西盆地的走向与构造线走向基本一致。

泸西喀斯特断陷盆地流域主要分布有古生界、中生界、新生界等地层,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,一般厚度为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,厚度在57~250 m;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,西南部永宁—舍者河谷区,厚度分别为313.16 m、314.57 m,中统个旧组( $T_2g$ )、法郎组( $T_2f$ )

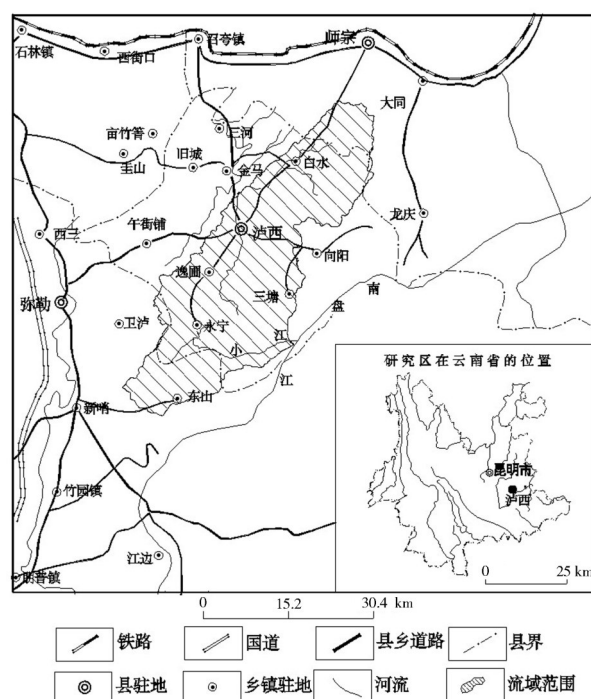


图1 泸西喀斯特断陷盆地交通位置图

Fig. 1 Map showing location and transportation of the Luxi karst fault-depression basin

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,而下统飞仙关组( $T_2f$ )为砂泥岩,分布在流域北部杨梅山,厚度为517 m,永宁镇组( $T_2y$ )为薄层灰岩夹砂泥岩,分布在流域东北部,厚度为401 m;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,厚度为1 713.5 m。流域内地层以个旧组 and 火把冲组分布最广。

泸西喀斯特断陷盆地流域大体可分为4个区<sup>[4]</sup>:

① 泸西盆地外围侵蚀溶蚀山区,属裸露型喀斯特区,地表喀斯特形态主要表现为侵蚀、溶蚀石峰、洼地、谷地等喀斯特地貌;② 溶蚀丘峰谷区,主要表现为溶丘台地槽谷区和喀斯特峰丛洼地区;③ 沉积平坝区,属覆盖型喀斯特区,地表喀斯特形态主要为零星的喀斯特残丘,形态低矮,与平坝相对高度一般小于20 m;④ 侵蚀溶蚀河谷区,属裸露型喀斯特区,喀斯特形态多样,组合类型齐全,喀斯特发育强烈但极不均匀,地表地下喀斯特孔隙多通过溶洞、漏斗、落水洞、溶隙等贯通,形成强大的喀斯特洞、管、隙的连通网络,该区溶洞管道主要发育有冒水洞暗河通道和永宁暗河通道。

## 2 地表水与地下水径流过程

泸西喀斯特断陷盆地流域地处南盘江西部喀斯特地区,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<sup>[5]</sup>,主要有白水塘、五者 2 个中型水库,平海子、无浪海、山衣、大衣 4 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

为  $8\,089 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。坝塘有知府塘、黄草洲、小雨龙、水管庙后坝塘等 194 个,水面都较小,总库容为  $281 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;地下水以喀斯特水为主,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)等大泉 120 个(图 2),及李子管、弯半孔等表层泉 27 个。隐伏喀斯特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  $439\,192.11 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,其中喀斯特泉及暗河允许开采量约占 70%<sup>[6]</sup>。

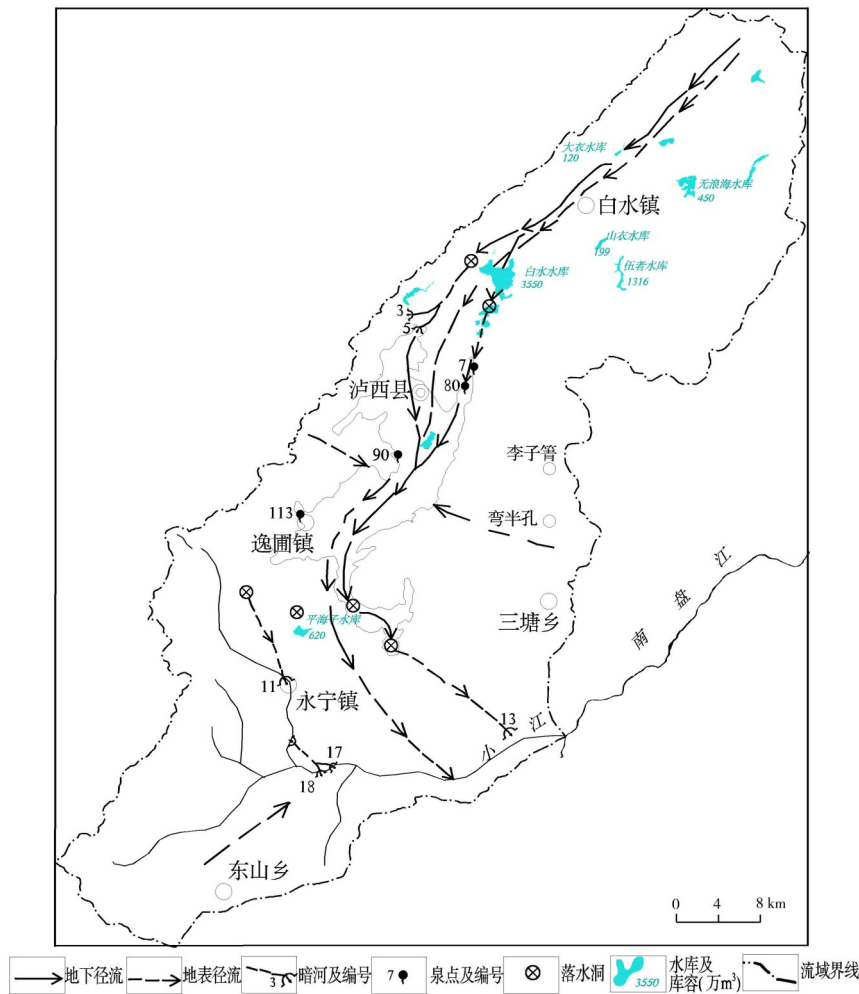


图 2 泸西喀斯特断陷盆地流域地表水、地下水转化径流路线图

Fig. 2 Map of surface water and groundwater conversion paths of watershed in Luxi karst fault-depression basin

### 2.1 地表水径流过程

流域内小江河纵贯全区,其支流多分布在中西部的谷地、盆地区,水库则多集中于喀斯特缓丘台地槽谷区。小江河为南盘江左岸一级支流,干流全长 97.5 km,积水面积为  $869.5 \text{ km}^2$ ,天然落差 1 001 m,河床平均纵坡为 1.03%,干流段河谷深切,河床纵坡为 2.62%。其常年不断流,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,最大流量为  $39.83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,最小流量为  $0.52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,年平均流量为  $5.44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,而上游益谷坝多年平均径流量为  $4\,933 \times 10^4 \text{ m}^3$  ( $1.56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )。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,向西南径流约 9 km 进入泸西县境的大无浪水库,再向右汇入宜乐白支流,入白水坝子,此段叫益谷河,向左汇入五者小河经益谷坝水文站、老干洞水库,通过小段



伏流,进入泸西盆地后叫西大河,汇入了来自盆地北东方向的东河后,向南径流,进工农隧洞,入平海子水库,在石老虎处伏流约2.6 km后进入永宁河谷,在冒烟洞处再伏流约2.4 km,折向东流进入小江河谷,最后于三塘乡的布德隆村附近注入南盘江。

## 2.2 地下水径流过程

泸西喀斯特断陷盆地流域是一个具有完整的补给、径流、排泄过程的喀斯特水系统,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。

其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。区内基岩裸露,土层薄,植被稀少,地形起伏度为250~760.3 m,垂向喀斯特发育,垂向渗流通道顺畅,径流速度快,多见洼地、漏斗、落水洞等,洼地密度大于28/100 km<sup>2</sup>;大气降水以洼地底部漏斗、落水洞等集中灌入式为主,直接补给地下水,入渗系数为0.35~0.55;地下水获得补给后向溶蚀丘峰谷地、盆地径流排泄,水动力条件较好,循环交替迅速,上层径流于谷地、盆地边缘以泉、暗河的形式出露,下层径流侧向补给覆盖区的喀斯特含水层。

溶蚀丘峰谷地区是地下水主要径流区。区内土层较厚,植被较少,地形起伏度为74~301 m,地表洼地、浅谷、落水洞、脚洞、溶沟溶槽发育,洼地密度大于23个/100 km<sup>2</sup>,入渗系数为0.15~0.35,发育季节性地表水系,地下缓降的溶洞管道汇集了山区来水,形成暗河或大泉,以快速管道流为主。该区上游的喀斯特含水层,以溶隙、蜂窝状溶孔为导水、储水空间,主要接受来自东侧侵溶蚀山区的侧向补给,喀斯特水获得补给后总体自北东向南西径流。下游喀斯特含水层以发育垂直或倾斜式的喀斯特洞穴、溶隙为主储水空间<sup>[7]</sup>,大气降水主要通过溶隙呈渗流式补给,地表水则通过洼地底部的漏斗、落洞以集中灌入式补给。

泸西盆地底部沉积平坝区,其水文地质功能为排泄、径流。大气降水除少部分补给松散孔隙水外,大多转化为地表径流。其基底喀斯特含水层,喀斯特赋水空间以溶隙、溶孔为主,喀斯特水主要接受侵溶蚀山区下层径流的侧向补给,自北东向南西径流,以网状隙流为主,三家以北局部微具承压性,三家一大兴堡水力坡度在0.3%左右,渗透系数为0.05~0.81 m·d<sup>-1</sup>。

侵溶蚀河谷区,为地下水排泄区,基岩较为裸

露,溶洞发育,平均入渗系数为0.27。在大兴堡附近,地下水径流由北部缓慢的平面二维网状裂隙流向南部快速的三维溶洞管道流转换,上游地表水通过落水洞进入陡降的集中管道,汇同盆地上游地下水的侧向补给与冒水洞暗河相连,以快速集中管道流为主。冒水洞暗河的历史流量为1 100~1 400 L·s<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>,2003年9月25日偶测流量为623.21 L·s<sup>-1</sup>,2018年5月22日偶测流量为1 290.1 L·s<sup>-1</sup>,2019年5月13日偶测流量为1 161.4 L·s<sup>-1</sup>。

## 2.3 地表水、地下水转化特征

泸西喀斯特断陷盆地流域地表、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、暗河的形式在泸西盆地底面排泄后转化成地表水,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。

小江河径流过程中,在盆地外围侵溶蚀山区主要接受大气降水补给,极少部分地下水通过裂隙径流和季节泉排泄汇流的形式对其补给。

在溶蚀丘峰谷地区,上游善导村、小吾乃白村、大依村、红旗农场、金家寨一带。大气降水除少部分补给第四系松散含水层外,大多转化成地表径流,流向下流的白水塘水库,而下伏喀斯特含水层,主要接受来自东侧侵溶蚀山区的侧向补给,自北东向南西径流。下游白水塘水库至阿庐古洞出口、江头村一带,地表水通过洼地底部的漏斗、落洞以集中灌入式补给地下水,地下水又以暗河出口、大泉形式排泄转入地表径流进入平坝区。

在沉积平坝区,大气降水除少部分补给松散孔隙水外,大多转化为地表径流,沿西大河流向下游大兴堡、知府堂一带,于小兴堡村南东方向1.5 km处的落水洞、知府堂村附近的多个落水洞转入暗河,喀斯特水主要接受侵溶蚀山区下层径流的侧向补给,自北东向南西径流。

整体上,在溶蚀丘峰谷地区,沉积平坝区,通过漏斗、落洞等方式补给下层(深层)地下水或以暗河、伏流等形式与上层(浅层)地下水互相补给、转换,但以暗河出口或大泉在谷地底部、平坝边缘排泄后的地下水补给小江河在该段占据主导。在侵溶蚀河谷区,小江河经落水洞潜入地下,一部分通过伏流出口沿小江河涌出地表后向南盘江径流,另一部分汇同侧向补给的地下水,在冒水洞暗河出口排泄后汇入

地表流(图2)。地表水与地下水转换较为频繁,由枯季测流分析,地下流量与地表转化地下流量相当。

### 3 流域边界的划分

保持地下水补给、径流、排泄过程的完整性,充分考虑地形、地貌、地层岩性、构造、喀斯特发育条件及发育规律、地下水排泄基准面等边界形成条件,按照从上到下、由一般到具体的次序进行划分<sup>[9-12]</sup>。

#### 3.1 流域边界和水系统划分依据

依据地形地貌划分流域边界:通过地貌及地貌组合形态的调查分析,可追溯地貌的形成过程,分析地表和地下径流过程的转化及结果。地形地貌在划分流域边界时是最简单、最直观的依据,在划分时大面积出露的碎屑岩和碳酸盐岩地区,以地形、地貌的最高分水岭为边界圈化,也可以根据遥感解译中地形地貌的相对高差圈化边界(a、b)。

依据地层岩性划分流域边界:考虑碎屑岩和碳酸盐岩的分界线<sup>[13]</sup>,及不同岩性的组合关系。碎屑岩上覆于碳酸盐岩,地表水、地下水从不同的方向径流,以高分水岭为流域边界圈化(c);碎屑岩下伏于碳酸盐岩,由于碳酸盐岩节理裂隙发育,受碎屑岩阻隔后汇集流向同一流域,以碎屑岩和碳酸盐岩接触带作为流域边界(d)。

依据地质构造划分流域边界:在考虑一侧阻水,一侧导水的情况下,地下水沿断裂在导水带径流,保证了地下水场在流域内,划分时以断裂界线作为流域边界(e)。

依据地下水排泄基准面划分:一个基本完整的流域,地下径流于排泄区河流或湖泊、湿地,以大泉、泉群、暗河集中排泄,该集中排泄基准选作为喀斯特流域地下水排泄边界控制点(f)。

水位及水动力联系是判断边界位置及性质的定量化依据。试验手段在峰丛洼地区及喀斯特山区,往往难于准确判断流域边界圈定,只有通过野外试验手段包括示踪试验、钻孔、水化学分析等,得出准确数据、推断边界。示踪试验能判断地下水的来源、接收量等以确定边界,钻孔抽水试验,通过观测附近钻孔水位下降和泉水流量减小情况来判断,水化学分析通过测试数据判断是不是同一含水层、同一径流带(g)。

受构造控制的地下导水洞管发育情况,往往是确定流域边界及完整性的关键因素。例如,挨来村一带,由于泸西盆地南东部受南北向构造——雨龙

断层和小江侵蚀溶蚀基准控制作用下,发育形成了倾斜的暗河洞管,通过落水洞群将盆地底部的地表水和地下水集中径流排泄到河谷区,在划分时为了地下水系统的完整性,将汇水—径流型盆地与排泄区间的水分水岭视为大流域内次级透水边界<sup>[14]</sup>(h)。

#### 3.2 水系统边界分异的勘探确定

在原来1:5万水文地质环境地质调查以及现有实施的水利工程详细勘察的基础上<sup>[15]</sup>,本次工作对泸西喀斯特断陷盆地流域既比村一带开展了1:1万的水文地质调查,较以往水文地质调查在水系统和边界划分有了很大的认识,从而对原有泸西喀斯特断陷盆地流域的水系统进行了优化调整。

既比村附近的水系统边界为侵溶蚀山区、溶蚀丘峰谷区、侵溶蚀河谷、泸西沉积平坝区4个类型水系统的交汇处,通过详细调查及实施水文地质钻探,泸西沉积平坝区边缘的落水洞地下水由北东向南西径流,因此水系统边界将落水洞补给的范围向北圈划,在沉积平坝区底部圈定一条地下水系统边界(图3),即小江河谷地下水系统(D)面积扩大,逸圃侵蚀溶蚀山区地下水系统(B<sub>1</sub>)和泸西平坝区地下水系统(A)面积减小。在原边界附近实施了两个勘察孔,孔深分别为151.09 m和151.53 m,静止水位为7.3 m和10.13 m,流量为838.94 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>和107.14 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,勘察孔的实施确定了该区的地下水补给来源。原来以地形地貌圈定水系统,这次以详细调查的成果和水文地质钻探为依据,重新优化调整了水系统边界。

#### 3.3 流域边界和水系统边界圈划

流域内有地下(地表)分水岭(a、b、c、d)、隔水(阻水)边界(e、f)、透水边界(e)、排泄边界(d),可分段圈划流域边界:

(1)流域北西部(①),从鲁克北—杨格黑—大斗坡—老干洞水库西—西租—益谷村—启发林—老紫薇一线,出露地层为砂泥岩,为相对隔水层,以最高高程点圈划流域边界(a、c),且地下(地表)分水岭一致。

(2)流域北、北东部(②、③),北部(②)为峰丛洼地区,泉水流量小,地下水径流缓慢,地下水分水岭为流域边界(g);北东部(③)拨云东—小沙湾东—子午老寨—跌跤坡—上果衣一线,为碎屑岩与碳酸盐岩交叠出露,地形切割浅,深度为50~100 m,排泄区以季节泉为主,水位埋深在100~150 m,地下水径流缓慢,以地下分水岭和地表高程点为流域边界(b、c)。

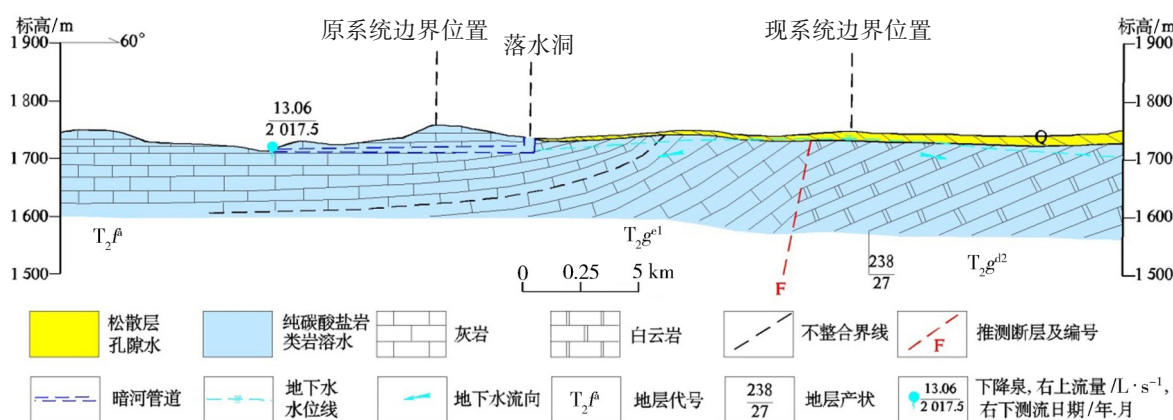


图3 泸西喀斯特断陷盆地流域既比村一带水系统边界划分剖面图

Fig. 3 Boundary division section of water systems around Jibicun village in Luxi karst fault-depression basin

(3)流域东部(④、⑤),④从平田—习岳大坡—大山坡—所梅乐—落水坡—阿洞村—老翻顶田—线,出露碳酸盐岩,以地下分水岭为流域边界(b);⑤李子箐—湾半孔东三塘北—线,出露碳酸盐岩,喀斯特发育,地形切割200~300 m,地下水径流深度在300~800 m,底板边界埋深在300~800 m,喀斯特地下水径流从补给区至下游河谷侵蚀基准,呈洞管潜流—管隙承压流—洞管潜流的转换过程<sup>[16-17]</sup>,以地下水分水界为流域边界(b),渗透系数为0.3~0.5;三塘—小黑箐—布德隆老寨—线,出露碳酸盐岩、碎屑岩,

喀斯特发育以管道流为主,底板边界埋深大于1 000 m,以地表分水岭为边界(a、b)。

2018年7月31日在方摆村大泉出口处(偶测流量为 $4\,773.61\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ),及冒水洞暗河出口(偶测流量为 $1\,161.4\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ )各安置了示踪实验自动接收仪,并于2018年8月1日,在三塘乡二塘天窗投下荧光素钠30 kg,天窗内暗河偶测流量为 $43.13\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。试验结果表明,方摆大泉未收到示踪剂,而冒水洞暗河出口在6 h后开始出现波动(图4),验证了流域东部边界(④、⑤)的划分。

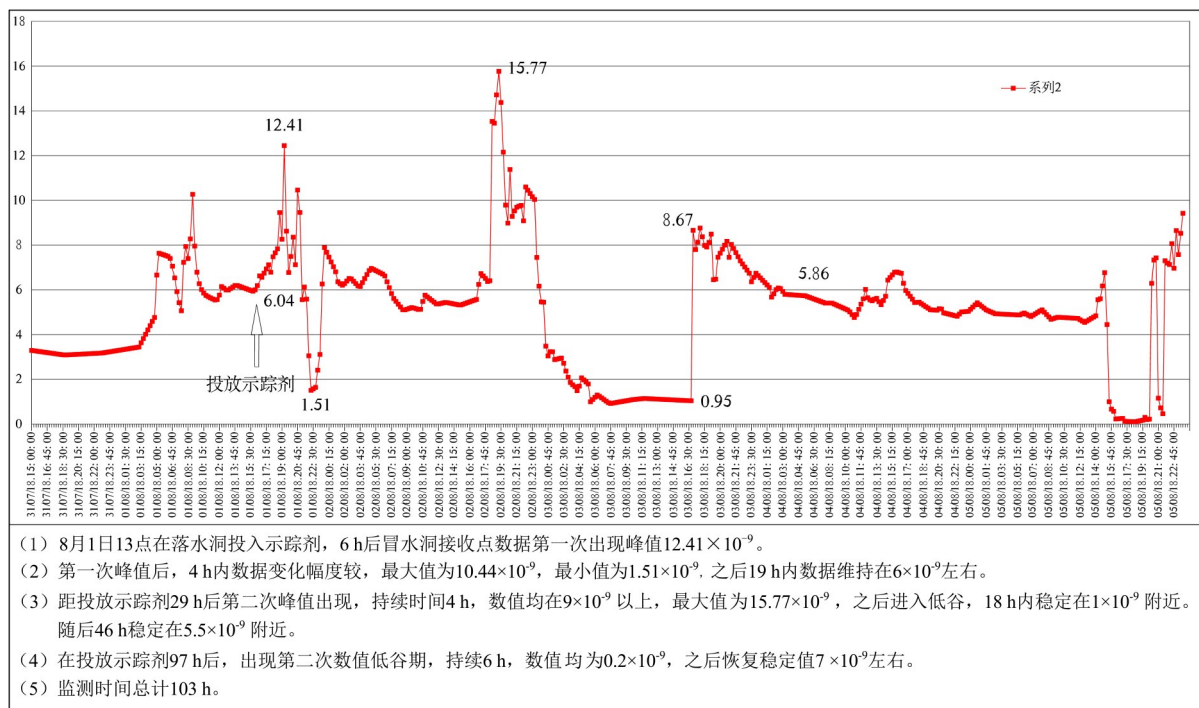


图4 冒水洞暗河示踪试验荧光素钠含量变化曲线图

Fig. 4 Fluorescein sodium variation curve of tracer test at underground river in Maoshui cave



(4) 流域南部(⑥), 从布德隆老寨—小江出口—下寨—阿峨—杨家寨一线, 出露断层、碎屑岩, 为泸西喀斯特断陷盆地地下水排泄基准面。以碎屑岩断层接触带的隔水边界、小江出口排泄边界、地表分水岭为流域边界(a、f)。

(5) 流域南西部(⑦), 从接雨坡—三家寨—李家寨南—大宿衣南—一线, 出露碳酸盐、不纯碳酸盐岩, 喀斯特发育一般, 地表无泉水出露, 以地下水分水岭为流域边界(b); 大宿衣南—雷打山—老鸭窝坡顶—上色耳古西, 出露碎屑岩, 以地表分水岭为流域边

界(a)。

(6) 流域西部(⑧), 从上红石岩—新明上寨—莲花塘—水箐—鲁克—一线, 出露碳酸盐岩、不纯碳酸盐岩, 以地下(地表)分水岭为流域边界(g、b)。

在调查及水文地质试验的基础上优化调整泸西喀斯特断陷盆地流域的边界, 并对其地下水补径排条件有了新认识, 这更能反映出整个泸西喀斯特断陷盆地流域的地下水系统及流域边界的完整性(图 5)。

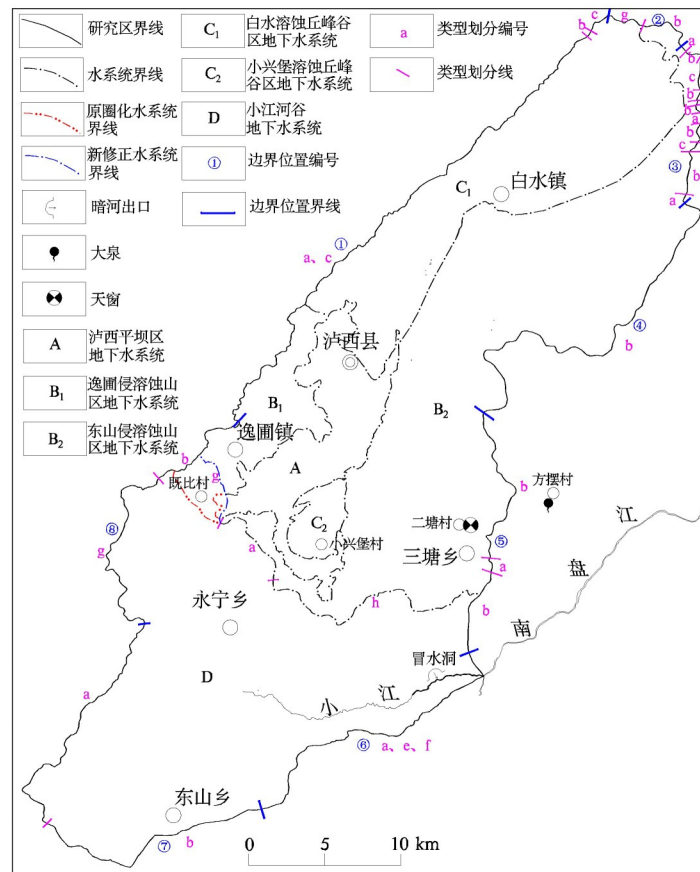


图 5 泸西喀斯特断陷盆地流域地下水系统及流域边界修正圈划图

Fig. 5 Modified delineation of groundwater system and watershed boundary in Luxi karst fault-depression basin

#### 4 结 论

泸西喀斯特断陷盆地流域地形地貌、地质构造及水文地质条件复杂, 流域边界类型复杂多样。

(1) 泸西喀斯特断陷盆地为一汇水—径流型断陷盆地。流域内地表水、地下水转化频繁, 盆地上游上层径流在盆地边缘以泉或暗河形式排泄成为地表水; 下游地表水又再次通过落水洞集中灌入补给地下水, 汇合盆底下层地下水径流一起向下游河谷区

作深远程径流, 此为一个完整的流域。

(2) 分段归纳其流域边界, 分别有地表分水岭、河流、隔水地层、隔水构造地等边界类型。

(3) 盆地下游地表分水岭与地下分水岭不一致, 盆地南部地表分水岭实际上是地下水的透水边界, 是地下水埋藏由浅变深的转化地带。

(4) 盆地底部南西部边缘既比村附近地表水、地下分水岭不重合, 经过勘探试验, 确定存在一条近南北向展布的地下分水岭。

## 参考文献

- [1] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础(第六版)[M].北京:地质出版社,2011:86-95.
- [2] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆出版社,1988:112-126.
- [3] 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):398-403.
- [4] 王宇,张贵,张华,等.喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J].中国岩溶,2017,36(3):283-295.
- [5] 水利部珠江水利委员会珠江水利综合技术中心.云南省泸西县水资源综合规划[R].2015.
- [6] 云南省地质调查院.云南泸西小江流域岩溶地下水调查与地质环境整治示范报告[R].桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2006.
- [7] 云南省地质矿产局滇南工程勘察公司.泸西县白水塘水库渗漏处理可行性研究勘察[R].1992.
- [8] 云南省地质局.1:20万弥勒幅区域水文地质普查报告[R].1979.
- [9] 王宇.西南岩溶石山区断陷盆地岩溶水系统分类及供水意义[J].中国岩溶,2003,22(6):220-224.
- [10] 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.
- [11] 裴建国,梁茂珍,陈阵.西南岩溶石山区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J].中国岩溶,2008,27(1):7-10.
- [12] 莫美仙,王宇,李峰,等.云南南洞地下河系统边界及性质研究[J].中国岩溶,2018,37(4):398-403.
- [13] 康晓波,王宇,张华,等.丽江黑龙潭群泉水文地质特征及断流的影响因素分析[J].中国岩溶,2013,32(4):398-403.
- [14] 王宇,李燕,谭继中,等.断陷盆地岩溶水赋存规律[M].昆明:云南科技出版社,2003:32-37.
- [15] 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.
- [16] 王宇.云南泸西小江流域岩溶水有效开发模式研究[D].昆明:昆明理工大学,2006:31-70.
- [17] 王宇.岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J].中国岩溶,2018,37(1):1-8.

## Watershed boundaries and hydrodynamic properties of surface water and groundwater in the Luxi karst fault-depression basin

WANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, ZHANG Gui<sup>1</sup>, ZHANG Wenjun<sup>1</sup>, GAO Yu<sup>1</sup>, LUO Weiqun<sup>3</sup>

(1. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** The Luxi karst fault-depression basin is located on the marginal slope of the southeast Yunnan plateau and is a tributary on the left bank of the Nanpan river system. It hosts two types of landforms, karst basins and karst river valleys. This basin also lies at the upstream in north, while the Xiaojiang karst river valley is at downstream in the south; both are connected by the underground flow system in the Maoshui cave to form a karst water system with complete recharge, runoff and discharge processes. The watershed boundary and hydrodynamic properties are the most important determinants of the watershed eco-geological environment and water flow characteristics. Accurate determination of the boundary and hydrodynamic properties of surface water and groundwater in the basins is a necessary prerequisite for runoff system simulation, water resource evaluation, searching and utilizing groundwater resources, development and protection planning of resources and environments, solution of environmental problems, and ecological restoration and protection. However, in previous work, the boundary of the groundwater basin divided by the hydrogeological environmental geological survey and evaluation is mainly along the boundary of the surface watershed, aquifer and aquiclude (band, body), most of which are not accurate enough. The hydrodynamic property of the boundary was mainly the result of hydrogeological analysis and inference. In this work, through detailed hydrogeological investigation and analysis, we initially delineated the boundary between surface water and groundwater basins in the Luxi karst fault-depression basin, and then revealed and controlled the hidden and inaccurate sections through drilling, tracer tests, and geophysical surveys, thus making the boundaries of watersheds and water systems revised more accurate. At the same time, we clarified the hydrodynamic properties of watershed boundaries, and obtained basic hydrogeological parameters, so as to provide a basis for model construction and solution conditions to the surface water and groundwater runoff systems in the basin.

**Key words** karst fault-depression basin, basin boundary, groundwater, surface water, hydrodynamic property

(编辑 黄晨晖)