

# 强岩溶非闭合流域水库天然径流分析研究

赵云, 赵玮, 党晓军

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

**摘要:** 我国是世界上岩溶发育最为广泛的国家之一, 岩溶分布广、面积大、类型多, 岩溶地区河流水资源结构的复杂性、实测资料的匮乏使得相关水文地质参数的获取变得困难, 一定程度上制约了岩溶地区工程建设。为了研究水库的多年平均径流量, 合理的确定水库规模, 文章分析了马坝河流域岩溶水的水动力联系; 采用降雨径流以及参证站相关对研究站点(龙塘水文站)径流资料进行插补延长, 得到坝址长系列天然来水量系列; 并结合水文地质调查成果, 验证径流成果的合理性。计算结果表明: 龙塘水库径流组成含有外流域古柏河的来水, 水库所在流域为非闭合流域, 水库所在地区为盈水地区, 同时坝址以上实际径流深能与周边相适应, 坝址径流结果合理。文章对强岩溶非闭合流域水库天然径流分析具有一定的指导意义。

**关键词:** 非闭合流域; 径流; 插补延长

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0224-07

## Natural Runoff Analysis of the Reservoir with the Karst Non-closed Basin

ZHAO Yun, ZHAO Wei, DANG Xiaojun

(Shaanxi Province Institute of Water Resource and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

**Abstract:** China has one of the most widely developed karst area all over the world, which is widely distributed with large area and various types. The complexity of structure of water resource in karst area and the lack of measured data are making obtaining hydrogeological parameters very difficult, which restricted engineering constructions in karst region to a certain extent. In order to analyze the average annual runoff of the reservoir and determine the reservoir size reasonably, the hydrodynamic relationship of karst water in Maba River Basin is analyzed. The runoff data of the research station (Longtang Hydrology Station) were interpolated and extended by using rainfall runoff and reference stations, and the long series of natural water intake at the dam site was obtained. Combined with the results of hydrogeological survey, the rationality of runoff results was verified. The calculation results indicate that the runoff composition of Longtang Reservoir contains the inflow from Gubai River in the outer drainage basin, the drainage basin where the reservoir is located is not closed, and the area where the reservoir is located is the area with abundant water. Meanwhile, the actual runoff depth above the dam site can be adapted to the surrounding area, and the runoff result of the dam site is reasonable. This paper has a certain guiding significance for the analysis of natural runoff of reservoirs in strong karst unclosed watershed.

**Keywords:** non-closed basin; runoff; interpolation extension

我国的岩溶较为发育, 在我国南方的云南、贵州、广西以及北方的山西、山东、河南等省份广泛分布有 346 万 km<sup>2</sup> 碳酸盐岩地层, 其中 91 万 km<sup>2</sup> 的碳酸盐岩裸露于地表<sup>[1]</sup>。由于我国各地区气候地质

条件不同, 岩溶发育强弱不同, 因而岩溶地貌与河系的发育也不相同<sup>[2-5]</sup>。岩溶地区河流的基本特征是流域不闭合<sup>[6]</sup>; 具有地表和地下两个水系、两个分水岭、两个流域的“二元结构”<sup>[7-8]</sup>。地表和地下流



内,通过灰岩中发育的溶洞向盆地内部排泄,并在径流过程中接受沿线地表水和地下水的补给;盆地内共有 3 处岩溶水集中排泄点,出露的泉水既有上升泉,又有下降泉,且泉水流量差异性较大,说明每个排泄点的补给来源为多层地下水,且相互之间水力联系微弱。

由区域水文调查资料<sup>[14]</sup>分析可知,盐源盆地与外侧存在地表和地下分水岭,且高程高于库水位 2 420 m,说明盐源盆地属于相对封闭的地下水系统。

### 3.2 库坝区岩溶管道联通试验

岩溶水是工程区最主要的地下水类型,查明岩溶水的动力特征和补排关系,从而查明库坝区岩溶系统是该工程勘察设计的重点。

为了查明工程区岩溶水的水动力联系,委托中国地质科学院岩溶地质研究所分别在白乌河(河床)高程 2 420 m 以上的麦地堰沟口段投放钼酸铵示踪剂 250 kg;在古柏河左岸大河乡大院子桥以东约 2 km 处一落水洞内投放荧光素钠 100 kg。接收点主要布置在马坝河水库、龙塘峡谷附近的各岩溶水排泄点(泉点)、钻孔。

钼酸铵示踪试验表明<sup>[15]</sup>,白乌河投放点以下河段地表水与马坝河流域各泉点之间没有水力联系。

白乌河每年 11 月下旬开始断流,至来年 5 月份有大气降雨才恢复流水。据水文观测,此间近 6 个月的时间并没有造成马坝河流域各岩溶泉水的突然断流或水量的剧减等水文动态变化,说明马坝河流域出露的泉水来自更远的西北地区,反映出白乌河与马坝河流域各岩溶泉水之间没有直接主导型补-排关系。

荧光素钠示踪试验表明<sup>[15]</sup>,古柏河流域大院子以上河段地表水及地下水与马坝河龙塘峡谷段之间存在密切的水力联系,即古柏河流域大院子以上河段的地表水和地下水均流向了马坝河流域,马坝河袭夺了古柏河。两者之间地下水应主要通过管道-裂隙混合型介质运移,并具有多个相互连通的路径:荧光素钠异常最先于大龙塘检出,随后分别为左龙眼、右龙眼,最终在石河坝泉检出,反映示踪剂弥散晕有自北向南推移、扩散的规律。含水介质属于岩溶裂隙-管道混合型,在左、右龙眼以较高浓度出露地表,并穿越马坝河在对岸的石河坝泉较高位置排出,具有一定的承压性,而大龙塘、东西小龙塘(水井)地下水管道相对通畅。

岩溶发育主要受构造及相对隔水岩层分布的控

制,地下水动力场也与此相适应,形成了该区特殊的地表水及地下水补排关系,见图 2。马坝河以地表水为主,同时还通过岩溶管道系统袭夺了古柏河上游的河水,增加了自身河流量。岩溶水是工程区最主要的地下水类型,工程区的岩溶水可分为马道子-大林乡水动力单元和长坪子-大院子水动力单元两个水力系统,其补排关系、水动力特征及水化学特征各异,在天然状态下,两个水动力单元的水力联系不密切。

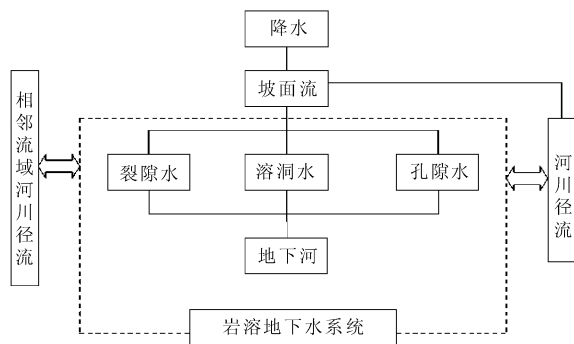


图 2 岩溶地区水力联系图

水文地质分析结论:龙塘水库所在的马坝河流域为非闭合流域,流域通过岩溶管道系统袭夺了古柏河上游的河水,增加了自身河流量,马坝河为盈水区域。

## 4 非闭合流域径流分析研究

流域内的径流包括地表径流和地下径流。因此,分水线也有地表分水线与地下分水线两种。如果地表分水线与地下分水线相重合,这样的流域称为闭合流域。但由于地质构造上的原因,地表分水线与地下分水线常常并不完全重合。这种流域称为非闭合流域。

在石灰岩发育地区,地层中常有岩溶管道,则本流域产生的地下水,有可能通过溶洞流到外流域去,而外流域的地下水也有可能通过溶洞流到本流域,这是一种非闭合流域。

龙塘水库位于盐源盆地北部的马坝河下游,马坝河以及邻近的白乌河、古柏河均流经了灰岩地区,区域内岩溶发育,坝址区由于马坝河低于两侧邻谷白乌河与古柏河,两侧邻谷灰岩峡谷段的地表水或地下水主要通过地下岩溶管道,集中排泄补给马坝河<sup>[16]</sup>,测得马坝河过境流量显著增大。为了分析不闭合流域龙塘水库的天然来水量,通过龙塘专用水

文站观测成果,以盐源县气象站降水资料以及邻近流域庄房站的径流资料插补延长龙塘站,得到龙塘站和水库坝址长系列多年平均径流量;结合水文地质调查和岩溶管道联通试验等勘察成果,勾绘出水库的地下分水岭,得到的水库实际汇水面积,使得插补延长后的水库多年平均径流深满足地区分布规律。

#### 4.1 坝址来水量分析

龙塘水文站仅观测有 1973 年—1987 年 15 年水文资料,为龙塘水库的设计提供了宝贵的资料,因此水文分析计算也依据这 15 年资料进行插补延长,得出满足规范要求的长系列坝址天然来水量系列。

(1) 采用降雨资料插补延长。马坝河本流域以上设有的雨量站,观测时间较短,根据马坝河周围雨量站分布情况,采用资料系列较长的盐源气象站进行分析,点绘龙塘站实测径流量与盐源气象站降水量同步图,见图 3,由图可以看出,龙塘水文站与盐源气象站降雨具有一定的同步性,径流深大于降雨量,一方面说明马坝河流域非闭合,另一方面说明雨量站代表性不好。

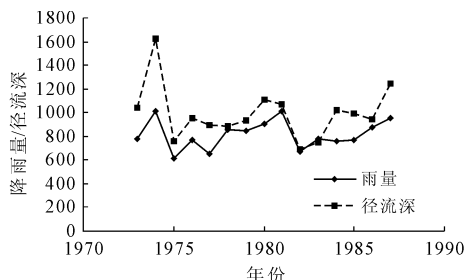


图 3 龙塘实测径流深与盐源气象站降雨量过程线

由于坝址以上为岩溶地区,地下水所占比例较大,采用龙塘站扣除基流(基流量采用龙塘实测最小月平均流量  $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ )的年径流量与盐源气象站年降水量、汛期径流量与汛期降水量分别相关,插补延长龙塘站年、汛期径流量,并以此为控制,得到插补后龙塘各月经流量。根据盐源气象站雨量的年内分配特点,雨量相关汛期采用 5 月—10 月,相关关系如下:

年:

$$\text{相关方程: } W_{\text{龙塘}} = 17.184P^{1.0792}$$

$$\text{相关系数: } r = 0.75$$

式中:  $W_{\text{龙塘}}$  为龙塘年径流量,  $\text{万 m}^3$ ;  $P$  为盐源气象站年降水量,  $\text{mm}$ 。

相关图见图 4。

汛期 5 月—10 月:

$$\text{相关方程: } W_{\text{龙汛}} = 16.871P_{\text{盐汛}}^{1.08}$$

相关系数:  $r = 0.76$

式中:  $W_{\text{龙汛}}$  为龙塘 5 月—10 月经流量,  $\text{万 m}^3$ ;  $P_{\text{盐汛}}$  为盐源气象站 5 月—10 月降水量,  $\text{mm}$ 。

相关图见图 5。

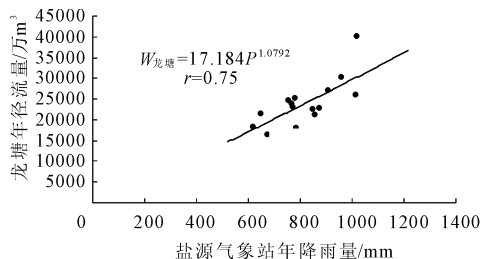


图 4 龙塘站(扣基流)年径流-盐源气象站年降雨量相关图

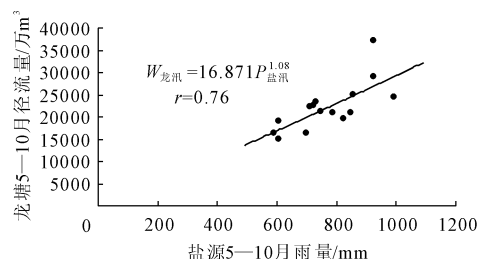


图 5 龙塘站 5 月—10 月经流量(扣基流) - 盐源气象站 5 月—10 月降雨量相关图

由以上方程插补年及汛期径流量,然后回加扣除的基流量,计算得到 1957 年—2018 年多年平均径流量  $2.42 \text{ 亿 m}^3$ 。

(2) 采用邻近流域参证站径流资料插补延长。与马坝河相邻的永宁河、宁蒗河、盐井河上分别设有盖租、庄房、甲米水文站,其中庄房站观测资料较好,系列也较长,且控制流域面积与马坝河龙塘站相差不大,同期实测径流的同步性较好,宁蒗河以上植被良好,森林覆盖率高,为相对闭合区域,见图 6,因此选用宁蒗河庄房站插补延长龙塘站。

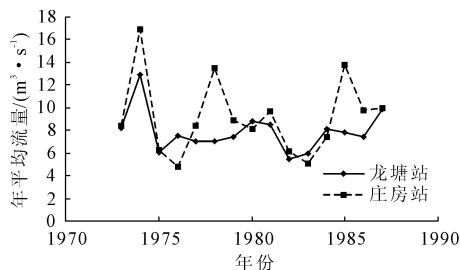


图 6 庄房站与龙塘站同期年平均流量过程线

参证站: 宁蒗河庄房站

资料系列: 1961 年—2018 年

根据龙塘站实测径流和庄房站相应的流量,分别进行年、汛期径流相关,汛期根据龙塘站实测资

料,采用 6 月—10 月,相关方程如下:

年:

$$\text{相关方程: } W_{\text{龙塘}} = 0.4459 W_{\text{庄房}} + 12564$$

$$\text{相关系数: } r = 0.78$$

相关图见图 7。

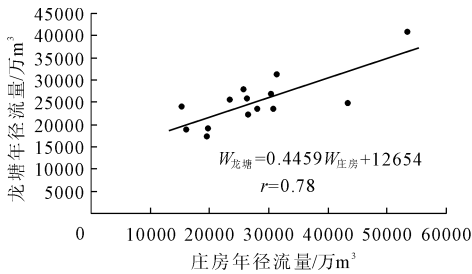


图 7 马坝河龙塘站年径流-宁蒗河庄房站年径流相关图

汛期 6 月—10 月:

$$\text{相关方程: } W_{\text{龙汛}} = 0.4283 W_{\text{庄汛}} + 12619$$

$$\text{相关系数: } r = 0.77$$

式中:  $W_{\text{龙汛}}$  为龙塘 6 月~10 月径流量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $W_{\text{庄汛}}$  为庄房 6 月—10 月径流量,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

相关图见图 8。

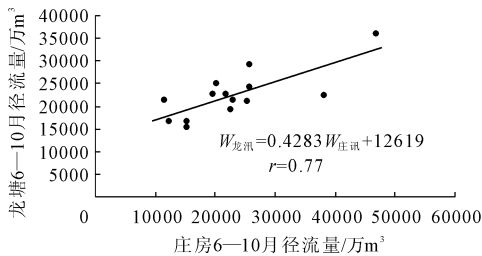


图 8 马坝河龙塘站-宁蒗河庄房汛期 6 月—10 月径流量相关图

根据以上相关关系可计算得到龙塘站 1961 年—2018 年多年平均径流量为  $2.47 \text{ 亿 m}^3$ 。

(3) 采用不同方法计算的多年平均径流量以及汛期径流成果,见表 1。

表 1 不同方法计算的龙塘站多年平均径流量成果表

方法	年径流 /亿 $\text{m}^3$	汛期 6—10 月 /亿 $\text{m}^3$	资料年限
降雨量插补 盐源气象站	2.42	2.01	1957—2018
	2.43	2.02	1961—2018
参证站插补 宁蒗河庄房站	2.47	2.21	1961—2018

龙塘站 1973 年—1987 年 15 年实测径流量  $2.49 \text{ 亿 m}^3$  ( $7.89 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 汛期 6 月—10 月径流量  $2.22 \text{ 亿 m}^3$ , 6 月—10 月径流占全年的 89.2%。

从表中可以看出,两种方法计算的龙塘长系列多年平均流量比较接近,由于庄房站插补的成果更

接近实测系列的分配,即汛期所占比例更接近,而雨量插补段,汛期 6 月—10 月径流仅占年径流的 83%,与实测段径流所占比例相差较大,因此采用庄房站插补成果。因此,龙塘站多年平均径流量为  $2.47 \text{ 亿 m}^3$ ,即  $7.83 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

#### (4) 龙塘坝址来水量

龙塘水文站位于龙塘水库坝址以上  $2 \text{ km}$ ,区间面积仅  $5.6 \text{ km}^2$ ,龙塘坝址的年径流直接采用龙塘站径流计算成果,即坝址多年平均径流量  $2.47 \text{ 亿 m}^3$ 。

坝址上下游是泉水主要的排泄区,主要分布于马坝河龙塘峡谷段上下游。考虑到泉水的不确定性以及水库蓄水后,径流补给条件变化,直接采用龙塘站流量作为坝址流量。

#### 4.2 坝址径流合理性分析

(1) 利用径流参数等值线图分析。根据地质连通试验报告得出以下结论:

a) 古柏河与马坝河存在密切的水力联系,古柏河流域大部分地下水均流向了马坝河。

b) 古柏河与马坝河之间地下水主要通过管道—裂隙混合型介质运移,并具有多个相互连通的路径。

c) 古柏河和马坝河属于统一的地下水系统,两者之间并没有地下分水岭。地下水总体自东向西径流,是古柏河地下水系统被马坝河流域地下水袭夺的结果。

d) 岩溶发育主要受构造及相对隔水岩层分布的控制,地下水动力场也与此相适应,形成了该区特殊的地表水及地下水补排关系——马坝河以地表水为主,同时还通过岩溶管道系统袭夺了古柏河上游的河水,增加了自身河流量。

古柏河位于马坝河东侧,流域面积  $316 \text{ km}^2$ ,其中大院子以上控制流域面积  $261 \text{ km}^2$ ,下三棵树、大院子一带,近坝区地表大部分被第三系地层覆盖,属岩溶荒原,区内岩溶形态以溶洞为主、少量落水洞,成为接受降雨及地下水的通道,是岩溶水的地下径流补给区。

马坝河龙塘站 58 年多年平均径流  $2.47 \text{ 亿 m}^3$ ,采用庄房站直接比拟计算的庄房站多年平均径流量为  $0.817 \text{ 亿 m}^3$  (庄房站 1961 年—2018 年实测多年平均径流量  $2.743 \text{ 亿 m}^3$ ),根据非闭合流域

$$W_0 = W' + \Delta W$$

式中: $W_0$  为设计流域为非闭合情况下的年径流(龙塘站  $W_0 = 2.47$  亿  $m^3$ );  $W'$  为设计流域为闭合情况下的年径流(通过庄房站比拟求得,  $W' = 0.817$  亿  $m^3$ );  $\Delta W$  为设计流域盈亏水量,根据此方法推求,推求马

坝河龙塘站  $\Delta W = 1.653$  亿  $m^3$ ,马坝河为盈水区域。

图 9 为四川省 1956 年—2005 年平均年径流深等值线图。

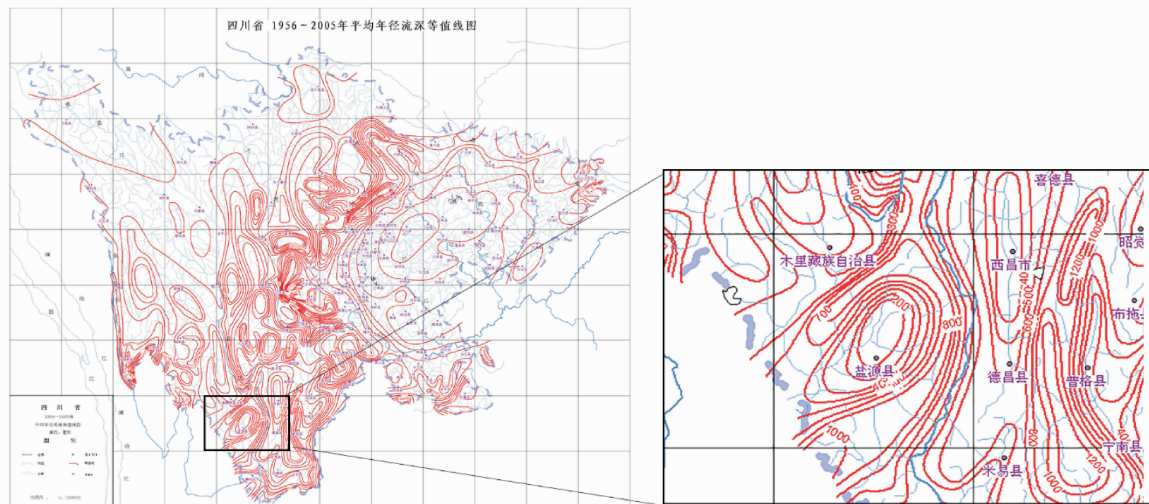


图 9 四川省 1956 年—2005 年平均年径流深等值线

查图得马坝河流域多年平均径流深为 400 mm 左右,径流深等值线是以闭合流域为基础编制的,龙塘站地表多年平均径流深 965 mm,扣除龙塘站盈水量,马坝河径流深与该地区径流深相协调。

将本地区各水文测站的径流统计参数列于表 2,从表中可以看出,龙塘水库实际控制面积 517  $km^2$ (古柏河大院子以上),计算实际径流深 480 mm,介于该地区径流深之间,能与地区各站径流深相协调。

表 2 地区水文测站径流统计参数

河名	站名	集雨面积 $F/km^2$	年均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	径流量 $/亿 m^3$	径流深 $/mm$	年限
马坝河	龙塘 256(地表)	517(总)	7.83	2.47	965(地表)	1961—2018
	坝址				478(总)	
宁蒗河	庄房	839	8.77	2.77	330	1961—2014
永宁河	盖租	1753	35.10	11.10	631	1959—2007
盐井河	甲米	4017	46.40	14.60	364	1959—2010
理塘河	呷姑	9162	138.00	42.50	475	1959—2008
小金河	列瓦	17812	278.00	87.60	492	1959—2007

(2) 岩溶地下水大龙塘泉水量分析。库坝址区岩溶水的补给主要形式为裸露灰岩岩溶洼地大气降雨直接补给和邻谷地表水、地下水集中补给。库区月亮湾以上段,两岸分布的地层中发育有各种形态

的岩溶,为大气降雨迅速直接补给地下水提供了良好条件。坝址、近坝库区及河间地块地区,多被透水性微弱的黏土岩覆盖,阻隔了大气降雨的直接入渗,该层厚度一般 40 m ~ 200 m,最大厚度达 260 m,但在坝址区由于马坝河低于两侧邻谷白乌河与古柏河,两侧邻谷灰岩峡谷段的地表水或地下水主要通过地下岩溶管道,集中排泄补给马坝河,测得马坝河过境流量显著增大,据近坝址区岩溶泉水出露点观测资料统计,大龙塘、东小龙塘、西小龙塘、左龙眼、右龙眼等多个泉年出水量达 7 107 万  $m^3$ ,邻谷的集中补给是本区段河谷地下水的主要补给来源。

总体而言,库坝址区岩溶水主要以管道流和脉状流两种形式存在,流向受构造形迹的控制,分别由马坝河的北东向南西和由北西向南东汇集于河谷较低侵蚀面排出,径流畅通,补排交替强烈。

大龙塘泉属岩溶水的径流排泄区,降水与泉水的流量有密切关系,采用盐源县气象与大龙塘泉 1975 年、2010 年—2016 年实测径流量同步分析计算大龙塘泉多年平均径流量为 4 820 万  $m^3$ 。

根据水文地质结论,大院子以上是大龙塘泉的补给区,其中大院子以上控制流域面积 261  $km^2$ ,根据参证站庄房径流量计算大院子以上径流量为 8 540 万  $m^3$ ,大龙塘泉径流量占大院子以上径流量

的 56%, 大院子以上径流量一半被袭夺, 这也说明了古柏河大院子以下河床断流积水的河道情况。

(3) 从马坝河的地形特点说明。马坝河坝址河床(高程 2 374 m), 低于东侧的古柏河(高程 2 404 m, 相当于马坝河三级阶地的高程)约 30 m; 低于西侧的白乌河(高程 2 391 m, 相当于马坝河二级阶地的高程)约 19 m, 河间地块存在连续的地下分水岭。马坝河流域平均相对高程较低, 这也是符合盈水区域的普遍地形特点。

以上这些水文地质特点, 造成了马坝河流域为盈水区域, 地表径流深较周边流域偏大。结合水文地质分析成果, 提出水库坝址以上总集水面积, 计算的径流深介于地区各站径流深之间, 能与地区径流深协调。

## 5 结 论

通过连通试验以及库坝区水文地质调查, 摸清水库来水补给条件, 龙塘水库来水不但有本流域马坝河的来水, 还有通过岩溶管道系统袭夺了古柏河上游的河水, 水库所在流域为非闭合流域。结合连通试验以及地质的分析结论, 划分流域的地下分水岭, 计算的坝址以上实际径流深能与周边相适应。龙塘水库径流组成, 含有外流域古柏河的来水, 为盈水区域。采用闭合流域参证站对设计依据站分丰、枯进行插补, 对摸清该地区盈亏水量具有一定的说明作用。

### 参考文献:

- [1] 石祥锋. 岩溶区桩基荷载下隐伏溶洞顶板稳定性研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2005.
- [2] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究[J]. 地学前缘, 1997( Z1 ): 21-29.
- [3] 李仁启. 碳酸盐岩区多层状岩溶发育模式及水文地质特征[J]. 西部资源, 2019, 88(1): 115-118.
- [4] 闫宗平, 杨绍平, 闫 胜, 等. 四川碳酸盐岩地区水库岩溶发育特征及岩溶渗漏评价[J]. 水电与新能源, 2016(9): 28-30, 37.
- [5] 陈宏峰, 张发旺, 何 愿, 等. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 42-47.
- [6] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world; Review of hydrological modeling approaches [J]. Reviews of Geophysics, 2014, 52(3): 218-242.
- [7] 姜维东. 喀斯特流域径流模拟分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2008.
- [8] 常 勇, 刘 玲. 岩溶地区水文模型综述[J]. 工程勘察, 2015, 43(3): 37-44.
- [9] 韩培丽, 代俊峰, 关保多. 径流计算方法及西南岩溶地区径流计算研究[J]. 节水灌溉, 2012(2): 46-49.
- [10] 刘广润, 冯彦东. 岩溶区水库水系统及其地下水系统研究[J]. 水电能源科学, 2002(1): 6-8.
- [11] 莫崇勋, 刘 朋, 朱新荣, 等. 变化环境下岩溶区流域径流变化特征研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 1164-1170.
- [12] 陈恒吉, 李劲华, 侯 凯, 等. 关于岩溶地区非闭合流域水库设计径流计算方法的探讨[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(10): 112-116.
- [13] 宁满顺、孙 杰, 等. 四川省凉山州盐源县龙塘水库枢纽岩溶渗漏专题研究报告[R]. 西安: 陕西省水利电力勘测设计研究院. 2015.
- [14] 王 平, 赵 玮, 赵 云, 等. 四川省盐源县龙塘水及灌区工程可行性研究报告[R]. 西安: 陕西省水利电力勘测设计研究院. 2017.
- [15] 马祖陆, 梁 晓. 四川省盐源县龙塘水库岩溶水示踪试验报告[R]. 桂林: 中国地质科学院岩溶地质研究所, 2013.
- [16] 刘基华, 张丙先, 谭书全, 等. 四川省凉山州盐源县龙塘水库及灌区工程地质勘察报告(初步设计阶段)[R]. 武汉: 长江勘测规划勘测设计研究有限责任公司, 2020.