

# 贵州普定马官岩溶地下水库 成库条件及效益研究

汪文富

(贵州省普定岩溶研究综合试验站, 普定 562100)

**摘要** 从岩溶水文地质基础、成库条件、水文计算原理和方法、工程评价等方面,对马官地下水库进行了研究。结果表明,马官地下水库成库地质条件较好,按水资源工程评价指标评价,该库的土地淹没和人口迁移、环保投资几乎为零,工程效益十分显著,是贵州岩溶区水资源综合、有效开发利用的典型范例。

**关键词** 岩溶 岩溶地下水库 成库条件 库容计算 效益评价

## 0 引言

贵州高原普定岩溶山区,由于岩溶的强烈发育,形成了一个具有二元流场、三维空间的水文地貌形态以及双重含水介质体结构的特点<sup>[1]</sup>,水源的产汇流有别于非岩溶区,形成地表严重干旱缺水,又不利于地表水资源开发利用的自然环境,给当地工农业生产和人民生活带来极大的困难。

为了解决该地区的供水问题,人们因地制宜地采用了蓄、引、提及区外调水等形式综合利用岩溶水资源。贵州普定马官岩溶地下水库就是这种综合利用岩溶水的一个成功尝试。本文从岩溶地下水库成库的岩溶水文地质基础、成库条件、水文计算原理和方法、工程评价等方面对其进行了研究。

## 1 地理地质概况

马官地下水库位于贵州省普定县马官镇,处于峰丛洼地—峰林谷地过渡带,建于1990年。建库时主要利用该地区发育的水洞地下河及与其相连通的冲头洼地联合蓄水,水库设计蓄水位1368.50m。水洞地下河经冲头洼地底部,流入马官峰林谷地中。地势由东向西降低,峰林海

作者简介:汪文富,男,1971年生,1994年毕业于贵州师范大学地理系,现为中科院地球化学研究所(贵阳)遥感应用专业硕士研究生。通讯地址:贵州普定。

收稿日期:1998-12-27

拔 1425~1550m,洼地高程 1306~1420m,相对高差 110~210m。冲头洼地底部高程 1342m,周围峰林高程 1425~1550m。

地质构造上,马官地下水库位于普定复式向斜东南大兴寨次级向斜的北西翼,岩层倾角平缓,于 4°~15°之间。断层不发育,构造裂隙有走向 N45°~50°E,S130°~140°E 两组。地层为三叠系关岭组中段( $T_2g^2$ )薄层至中厚层泥质灰岩夹少量泥页岩(图 1)。

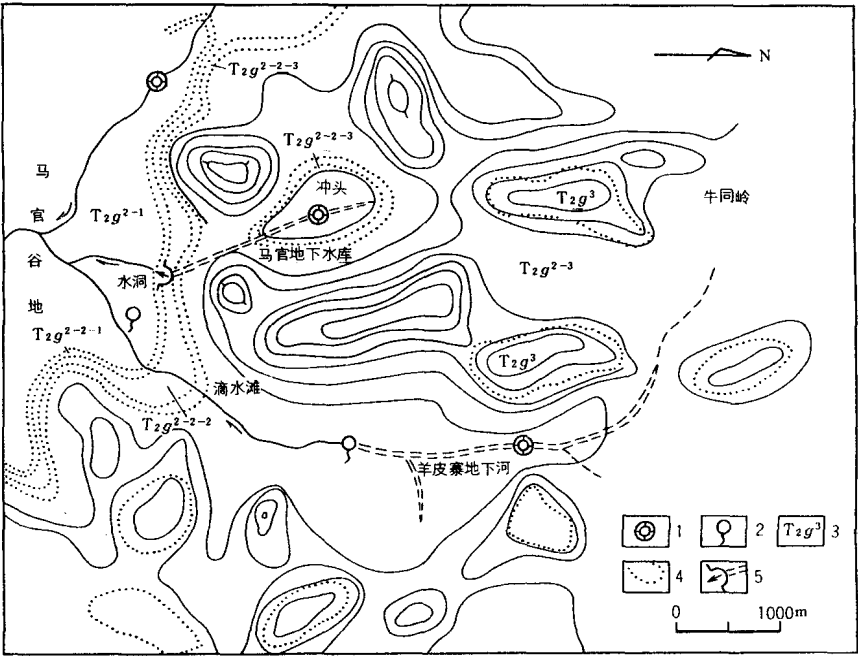


图 1 马官地下水库水文地质图

Fig. 1 Hydro-geologic map of Maguan underground reservoir

1. 落水洞;2. 泉;3. 地层代号;4. 地层界线;5. 地下河

2 马官地下水库成库条件分析

2.1 地下河及溶道系统结构

水洞地下河是一条具有单管状、单层状、单一出口(图 2)的悬挂式尖灭型地下河。该地下河从水洞口向冲头洼地延伸,尖灭于洼地内,并与洼地中的落水洞、竖井相通,经地面勘测,估计其长度约 740m,其中可测长度 200m。

在垂直方向上,地下河水平溶道只有一层,出口也只有一个,出口高程 1223.05m,悬挂于尖山坡脚,比库前马官谷地高 15m 左右。从实测洞段得知,溶道洞段多呈矩形,宽 2~10m,平均约 3.7m;高 0.5~5m,平均约 1.6m;河床比降约 10%。洞内崩塌石块很少,有少量砂砾和粘土沉积于河床。洞口最大洪水流量约 3.5m³/s,最枯流约 1 l/s。

地下河管道系统简单,即由单一的水平溶道与两个垂直竖井及裂隙组成岩溶管道系统(图 3)。地下河发育于  $T_2g^{2-2-2}$  灰岩中,其上为  $T_2g^{2-2-3}$  泥质页岩隔水顶板。由于岩溶裂隙发育较弱,地下河又只有一个出口,因此调蓄能力较小,一般暴雨之后,冲头洼地四周山坡坡面水流汇

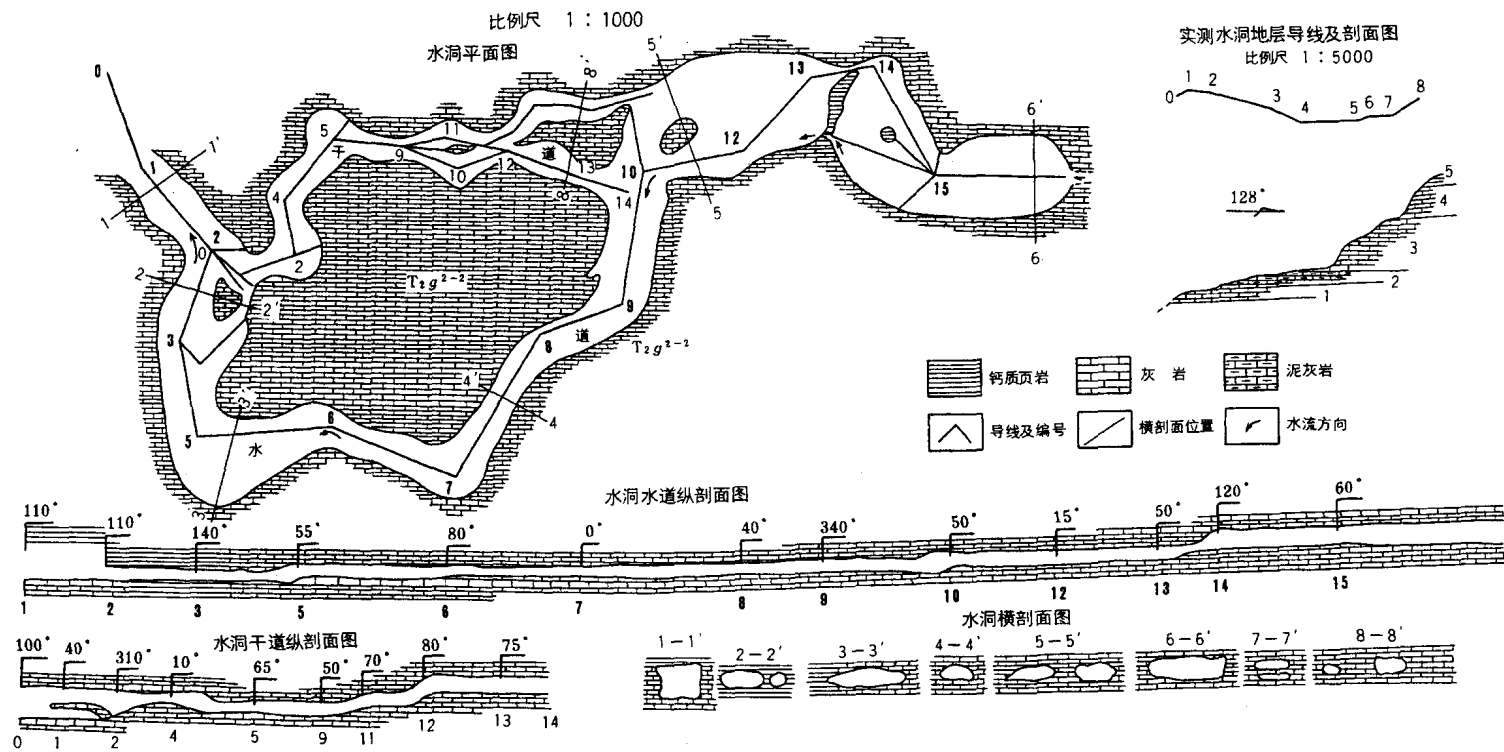


图 2 马官地下水库洞穴实测图

Fig. 2 Measured cave map of Maguan underground reservoir

集洼地,洼地积水成涝,经 2~3 小时才能由管道向洞口排完。

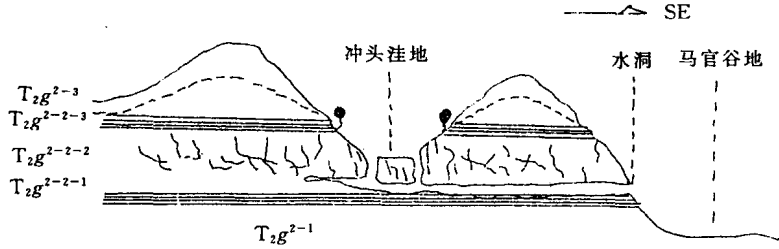


图 3 马官地下水库形态纵剖面示意图

Fig. 3 Longitudinal profile of the shape of Maguan underground reservoir

2.2 库盆结构及渗漏问题

马官地下水库库盆由两个部分组成,即地表库盆地下库盆。地表库盆为闭合的冲头洼地,洼地为椭圆形,长轴长约 300m,短轴约 150m。地下库盆为水洞地下河流域的地下水位凹槽。地表库盆主要拦蓄坡面水流,地下库盆主要储蓄坡地下渗裂隙水量,二者由洼地中的漏斗、落水洞连通。该库盆能否蓄水和发挥效益,其关键是库区的渗漏问题。

2.2.1 库底渗漏

从水库地质结构可知,库底下部有  $T_2g^{2-2-1}$  泥质隔水层分布,该隔水层虽厚度不大,但未受断层及大裂隙破坏,隔水性仍然良好,水洞地下河即是沿这一隔水层顶面流出的。水化学分析资料也证实隔水层上( $T_2g^{2-2-2}$ )下( $T_2g^{2-1}$ )灰岩含水层无水力联系,两层地下水类型截然不同(表 1)。 $T_2g^{2-2-2}$  中的岩溶水为重碳酸钙镁型水,而  $T_2g^{2-1}$  中的岩溶水属硫酸重碳酸钙镁型水。矿化度及电导率几乎也相差 2 倍。隔水层可成功地阻止库水向库底部渗漏。

表 1  $T_2g^{2-2-1}$  隔水层上下含水层( $T_2g^{2-2-2}$ ,  $T_2g^{2-1}$ )岩溶水化学成分对照表

Tab. 1 Comparison of karst hydro-chemical components of aquifers  
( $T_2g^{2-2-2}$ ,  $T_2g^{2-1}$ ) above and below the  $T_2g^{2-2-1}$  aquifuge

| 含水层            | 取样地点 | 取样时间      | $Ca^{2+}$<br>(mg/l) | $Mg^{2+}$<br>(mg/l) | $SO_4^{2-}$<br>(mg/l) | $HCO_3^-$<br>(mg/l) | 矿化度<br>(mg/l) | 电导率<br>( $\mu s/cm$ ) |
|----------------|------|-----------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------|-----------------------|
| $T_2g^{2-2-2}$ | 水洞   | 90. 5. 29 | 59. 12              | 21. 26              | 33. 62                | 244. 08             | 248           | 405                   |
| $T_2g^{2-1}$   | S 泉  | 90. 5. 29 | 135. 27             | 29. 77              | 247. 35               | 250. 18             | 549           | 805                   |

(据普定岩溶试验站资料)

2.2.2 侧向渗漏

库区侧向均为灰岩,无隔水层分布,是否产生侧向渗漏取决于岩溶裂隙、孔隙、构造等是否发育和与其相邻的地下河流域的地下分水岭是否存在。

库区以东和以北为羊皮寨地下河流域,实地勘察结果表明,羊皮寨地下河与水洞地下河之间有一地下分水岭存在,羊皮寨地下河水位比水洞地下河水位高 42m。由此可见,水库蓄水后不可能向北和向东渗漏。

库区以西和以南为马官谷地,低于水库正常蓄水位 56m,山体单薄,是可能渗漏地段。野外勘察证实该山体岩溶发育极弱,无一洞穴出现,实际上是一段岩溶极弱发育的相对隔水层。此

外,连通实验也证实除水洞以外再无其它出口。基于上述认识,该库盆不会产生库区渗漏<sup>[2]</sup>。

### 2.3 坝址及坝型

岩溶地下水库坝体与地表水库坝体的功能是相同的,因此地下水库的坝址应选在地下水汇流区,地下暗河系统、地下径流集中地带,即汇流面积大,坝址截流断面小、岩体稳定而且没有绕坝渗漏可能性的地方,或有绕坝渗漏但易于处理的地带。

如前述,库区马官地下河溶道为单层、单管状,且仅有一个出口,而且出口洞段形状规则;此外,实地勘测及试验资料表明,地下河洞口段岩石坚硬,岩层稳定,无断层分布,构造裂隙不发育,河床底部堆积物极少,基岩裸露,洞体断面小,易施工,是所选的坝址中最佳的筑坝位置。经论证,设计中所采用的坝型为全封闭重力圆形拱坝。

## 3 库容分析计算

为了有利于地下水库的规划设计及建设,对马官地下水库的库容进行分析计算。考虑到库容由地下库容和地表库容组成,因此先分别计算地下库容和地表库容,再计算总库容。地下库容计算采用等水位线分层计算法,其库容为  $1.44 \times 10^4 \text{m}^3$ ;地表库容计算与地表水库相同,为  $131.1 \times 10^4 \text{m}^3$ ,库容较大(表2)。因此,马官地下水库的总库容为  $132.54 \times 10^4 \text{m}^3$ 。蓄水高程与库容曲线如图4所示。

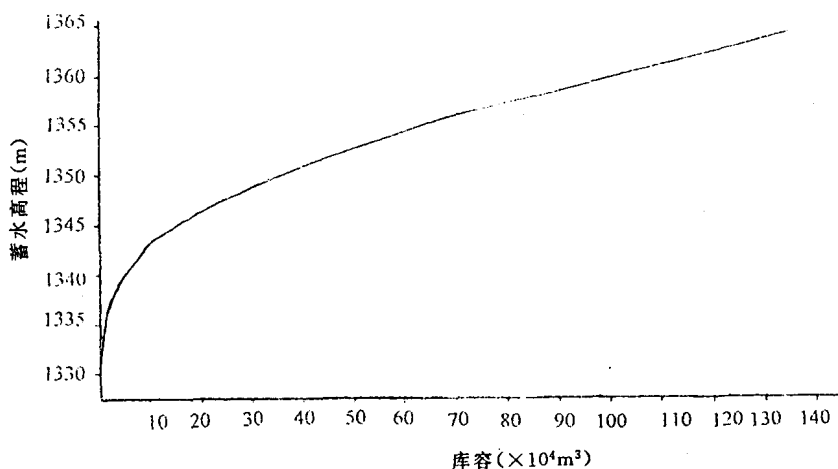


图4 马官地下水库库容曲线图

Fig. 4 Storage capacity curve of Maguan underground reservoir

## 4 补给量计算

### 4.1 库区天然补给量

马官地下水库库区范围为一完整的水文地质单元,集雨面积为  $0.47 \text{km}^2$ ,水库产流结构(图5)属完全补给型<sup>[3]</sup>,即降水除蒸发外全部进入地下水库。水库的入库水量据地下水库邻近的母猪洞水文站资料,采用岩溶水模型——普定岩溶水模型Ⅱ计算。该模型认为,当满足影响

层缺水量后,库区岩溶水补给可用简单水量平衡方程表示:

表 2 马官地下水库库容表

Tab. 2 The storage capacity of Maguan underground reservoir

| 水位(m)   | 水位面积<br>( $\times 10^4\text{m}^2$ ) | 地下库容<br>( $\times 10^4\text{m}^3$ ) | 地表库容<br>( $\times 10^4\text{m}^3$ ) | 总库容<br>( $\times 10^4\text{m}^3$ ) |
|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1323.00 |                                     | 0                                   | 0                                   | 0                                  |
| 1325.00 |                                     | 0.144                               | 0                                   | 0.144                              |
| 1330.00 |                                     | 0.529                               | 0                                   | 0.529                              |
| 1335.00 |                                     | 0.914                               | 0                                   | 0.914                              |
| 1340.00 | 0.30                                | 1.442                               | 1.6                                 | 3.042                              |
| 1345.00 | 2.33                                | 1.442                               | 8.2                                 | 9.642                              |
| 1350.00 | 4.58                                | 1.442                               | 27.1                                | 28.542                             |
| 1355.00 | 6.21                                | 1.442                               | 54.1                                | 55.542                             |
| 1360.00 | 7.93                                | 1.442                               | 89.6                                | 91.042                             |
| 1365.00 | 8.62                                | 1.442                               | 131.1                               | 132.542                            |

(据普定岩溶试验站资料)

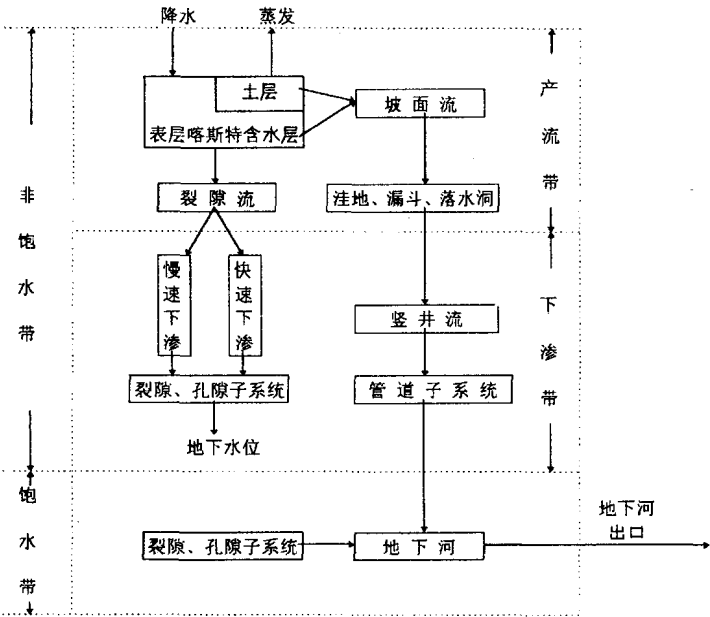


图 5 马官地下水库产流结构图

Fig. 5 Runoff yield of Maguan underground reservoir basin

$$R(T+1) = P(T+1) - E(T+1) - [WM - W(T)]$$

式中: $R(T+1)$ 、 $P(T+1)$ 、 $E(T+1)$ ——分别为  $T+1$  日的流域平均补给量、雨量和蒸散发量 (mm);  
 $WM$ ——流域影响层平均最大蓄水容量 (mm);  
 $W(T)$ —— $T$  日末流域平均蓄水量 (mm)。

由于各处影响层缺水量的不同,产生的补给量就有先后,甚至不产生任何补给量。若以  $W'$ 、 $W'(T)$ 、 $R'(T+1)$  分别代表点的蓄水容量、起始蓄水量和补给量,在  $P(T+1) > W' - W'(T)$  处,产生补给,  $R'(T+1) = P(T+1) - E(T+1) - [W' - W'(T)]$ ; 在  $P(T+1) \leq W' - W'(T)$  处,不产生补给,即  $R'(T+1) = 0$ 。显然,全流域面积( $F$ )的补给量  $R$  是各点  $R'$  的平均值。即:

$$R(T+1) = 1/F \int_0^F R'(T+1) dF = 1/F \int_0^F \{P(T+1) - E(T+1) - [W' - W'(T)]\} dF$$

影响层缺水量  $[W' - W'(T)]$  在流域上的分布可用流域蓄水容量分配曲线表示。流域蓄水容量分配曲线相当复杂,通常只能由实测水文资料选配。本文用  $B$  次方抛物线方程简化:

$$F_0/F = 1 - (1 - W'/MWM)^B$$

式中:  $F_0$  为小于和等于蓄水容量  $W'$  的各小块面积之和,  $MWM$  为点的最大蓄水容量,抛物线指数  $B$  值反映流域蓄水量不均匀性,主要决定于流域土层及皮下带物理性质、厚度及分布情况。

流域平均蓄水容量  $WM$  为:

$$WM = \int_0^{MWM} [1 - (F_0/F)] dW' = [1/(1+B)] MWM$$

同理:

$$W(T) = \int_0^{P_0} [1 - (F_0/F)] dW' = [MWM/(1+B)] [1 - (1 - P_0/MWM)^{1+B}]$$

$$P_0 = MWM \{1 - [1 - (W(T)/WM)]/(1+B)\}$$

$P_0$  为流域平均蓄水量  $W(T)$  的相应纵坐标值。

岩溶水补给量  $R$  分两种情况计算:

$$(1) \text{ 当 } P_0 + P < MWM \text{ 时, 则 } R = \int_0^{P_0} (F_0/F) dW' = P - [WM - W(T)] + WM[1 - (P_0 + P)/MWM]^{1+B}$$

$$(2) \text{ 当 } P_0 + P \geq MWM \text{ 时, 则 } R = P - [WM - W(T)]$$

在应用时,待参数  $B$ 、 $MWM$  值优先确定后,只要已知流域起始蓄水量  $W(T)$ ,就可由降雨量求出岩溶水补给量。

流域起始蓄水量,由流域影响层水量平衡方程求得:

$$W(T+1) = W(T) + P(T) - R(T) - E(T)$$

式中  $P(T)$ 、 $R(T)$  均系实测资料。因此,流域蓄水量计算的核心问题是流域蒸散发量计算。库区为裸露型峰林洼地,溶蚀裂隙发育,但蓄水容量较小,其与大气的水分交换极为迅速,雨后不久,即被蒸散发耗尽,其蒸散发过程可简化为敞开式单层蒸散发,即按充分供水条件下,以蒸散发能力( $EM$ )蒸发。

当  $P(T+1) + W(T) \geq EM(T+1)$  时,则  $E(T+1) = EM(T+1)$

当  $P(T+1) + W(T) < EM(T+1)$  时,则  $E(T+1) = P(T+1) + W(T)$

因此,单层蒸散发计算的流域蓄水量为:

$$W(T+1) = W(T) + P(T) - R(T) - E(T)$$

#### 4.2 引洪入库补给量

水洞地下河东面有一相邻的羊皮寨地下河,集雨面积  $1.77\text{km}^2$ ,发源于牛同岭洼地,经羊

皮寨流至滴水滩为明流。滴水滩河床高程 1365m,比冲头洼地底部高 24m。经流量测量,过滴水滩河床的最大洪峰流量为  $5 \sim 5.5 \text{ m}^3$ 。修建引洪渠 540m,拦河坝 30m,隧洞 138m,即可将洪水引入水库(冲头洼地地表水库)。经采用同一岩溶水文模型计算,羊皮寨地下河集雨区来水量,平水年( $P=50\%$ )为  $153 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,枯水年( $P=75\%$ )为  $89.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,特枯年( $P=95\%$ )为  $81.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ (表 3)。将羊皮寨地下河集雨区水量,通过引洪入库工程引入马官地下水库,水库入库水量大大增加。水库总蓄水量平水年可达  $194 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,枯水年与特枯年水库入库蓄水量分别为  $118 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $103 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。后两设计年水库蓄水量对于农业灌溉用水和农村人畜用水尤为重要。

表 3 马官地下水库不同设计年入库水量

Tab. 3 The water volume into Maguan underground reservoir in different design years

| 地点  | 水面面积<br>( $\text{km}^2$ ) | 设计年      | 入库水量( $\times 10^4 \text{ m}^3$ ) |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |              |
|-----|---------------------------|----------|-----------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
|     |                           |          | 1                                 | 2     | 3     | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12 年         |
| 水洞  | 0.47                      | $P=50\%$ | 0.334                             | 1.879 | 0.285 | 4.105  | 5.009  | 6.627  | 3.858  | 4.621  | 5.874  | 4.423  | 2.638  | 1.133 40.79  |
| 羊皮寨 | 1.77                      | (平水年)    | 1.259                             | 7.076 | 1.073 | 15.459 | 18.823 | 24.955 | 14.565 | 17.527 | 21.359 | 16.856 | 9.931  | 4.265 153.15 |
| 水库  | 2.24                      |          | 1.593                             | 8.955 | 1.358 | 19.564 | 23.832 | 31.582 | 18.423 | 22.148 | 27.233 | 21.279 | 12.569 | 5.398 193.94 |
| 水洞  | 0.47                      | $P=75\%$ | 0.001                             | 0.001 | 0.012 | 0.530  | 7.313  | 8.023  | 11.693 | 0.281  | 0.519  | 0.247  | 0.112  | 0.001 28.73  |
| 羊皮寨 | 1.77                      | (枯水年)    | 0.021                             | 0.003 | 0.046 | 1.997  | 27.537 | 11.334 | 44.037 | 1.056  | 2.333  | 0.931  | 0.421  | 0.001 89.72  |
| 水库  | 2.24                      |          | 0.022                             | 0.004 | 0.058 | 2.527  | 34.850 | 19.357 | 55.730 | 1.337  | 2.852  | 1.178  | 0.533  | 0.002 118.45 |
| 水洞  | 0.47                      | $P=95\%$ | 0.125                             | 0.234 | 0.114 | 0.370  | 4.137  | 4.202  | 3.943  | 1.429  | 1.098  | 3.568  | 1.844  | 0.692 21.76  |
| 羊皮寨 | 1.77                      | (特枯年)    | 0.474                             | 0.880 | 0.430 | 1.395  | 15.769 | 4.824  | 34.348 | 5.383  | 4.136  | 8.585  | 2.944  | 2.107 81.28  |
| 水库  | 2.24                      |          | 0.599                             | 1.114 | 0.544 | 1.765  | 19.906 | 19.026 | 38.291 | 6.812  | 5.234  | 12.153 | 4.788  | 2.799 103.04 |

(据普定岩溶试验站资料)

## 5 工程评价

马官地下水库由于是利用天然的地下河道及与其相连通的岩溶洼地蓄水,其水库坝体为砌石拱坝,拱厚为 0.4m,顶拱中心角  $2\Phi=60^\circ$ ,工程量小(拱坝清基 250m,砌料石  $1474.5 \text{ m}^3$ ,混凝土  $160 \text{ m}^3$ ),投资省,见效快,当年动工当年受益。

该地下水库蓄水  $132.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,兴利库容为  $132.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,产生了巨大的效益:自流灌溉面积 330 多公顷,每年可增产粮食 500t,增收 130 万元;防洪排涝,雨季将羊皮寨地下河流域洪峰  $5.52 \text{ m}^3/\text{s}$  引入水库,使马官田坝约 33ha 良田免遭涝灾;不用动力(自流)的自来水,解决马官镇机关及马官村约 5000 人、1200 头大牲畜的人畜用水,实现自来水化;马官村是普定县人口最多的一个行政村,过去全村 3000 人共饮用一污染极为严重的井水(泉水),由此而引起每年春秋两季不同程度地发生伤寒病,为贵州省伤寒病高发区、多发区,是省、地、县三级重点防疫区,自改善饮水条件,村民饮用上了由该地下水库自流的自来水后,伤寒病无一例发生;供水条件的改善,使乡镇建设得以按规划进行,乡镇面貌得到了极大的改善,为马官镇乡镇企业的发展解决了部分水资源,推动了乡镇企业的发展。

如按水资源工程评价指标<sup>[4]</sup>评价:即①单位水量效益指标,即兴利效益  $P_i$  与水库总容积  $V_T$  之比,加上防洪效益  $P_f$  与防洪库容  $V_f$  之比的总和,记以  $A$ ,以单位水量的效益  $P$  表示,单

位为元/ $\text{m}^3$ ,表达式为  $A = \sum_{i=1}^n P_i/V_T + P_f/V_f$ ; ②单位水量淹没土地面积  $\Omega_s$  指标,即水库设计蓄水位(或正常高水位)下淹没土地面积,以  $\text{hm}^2/\text{m}^3$  表示,即  $B = \Omega_s/V_T$ ; ③单位水量迁移安置人口指标,即指水库达到设计蓄水位时需迁移人口数与总库容之比,以人/ $\text{m}^3$  表示,即  $C = n_p/V_T$ ; ④单位水量环境保护投资指标,即水库蓄水至正常高水位时,为保护、改善生态环境所采取措施的投资  $K_e$  与总库容之比,单位以元/ $\text{m}^3$  表示,即  $D = K_e/V_T$ ,那么,  $B$ 、 $C$ 、 $D$  几乎为零,表明该项目对土地淹没面积、人口迁移、环保投资可以近似认为无任何投入,工程取得了良好的经济、社会效益,从而使人口、资源、环境与经济协调发展。

### 参 考 文 献

- 1 喻锦标等. 中国喀斯特发育规律典型研究. 科学出版社, 1990. 10: 229~248
- 2 周济作, 邓自民. 岩溶地区中小型水库渗漏防治. 四川水利, 1984. 第2期
- 3 邹成杰. 岩溶管道水汇流理论研究. 中国岩溶, 1992, 第11卷, 第2期
- 4 冯尚友, 梅亚东. 水资源持续利用规划. 中国水利水电出版社, 1998, 第9卷, 第1期
- 5 袁道先等. 岩溶环境学. 重庆出版社, 1988

## STUDY ON THE CONSTRUCTION CONDITIONS OF MAGUAN UNDERGROUND RESERVOIR AND ITS BENEFIT AT PUDING, GUIZHOU

Wang Wenfu

(Comprehensive Experimental Station of Karst Research, Puding Guizhou Province, Puding 562100)

### Abstract

Based on the studies of the karst hydro-geological background, construction conditions of the reservoir, principle and method of hydrological calculation, a project assessment for Maguan Reservoir was made. The results show that the geological conditions of the reservoir construction are favourable, and the engineer benefit is remarkable, which provides a typical example for comprehensive effective exploitation and utilization of water resources in karst area.

**Key words** Karst Karst underground reservoir Reservoir conditions Storage calculation  
Benefit assessment