

# 长距离输水工程水力过渡过程仿真研究

王海军, 张林彬, 赵新

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**通过分析空气罐和空气阀的运行特点,建立了长距离有压输水工程水力过渡过程仿真模型。结合实际工程,采用该模型开展了输水系统在事故停泵、水泵启动和关闭等多种工况下的水锤压力分布规律研究。根据分析结果给出了相应的运行建议,为输水工程建设提供了数据支持。

**关键词:** 输水工程; 水力过渡过程; 水锤; 空气罐; 空气阀

中图分类号: TV134

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0012-05

## Simulation of hydraulic transient process of water transfer project of long distance

WANG Haijun, ZHANG Linbin, ZHAO Xin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Through analyzing operation characteristics of air vessel and air valve, this paper built the simulation model hydraulic transient process of long distance water transfer projects. Combined real project, it used the model to study the distribution law of water hammer of long distance water transfer system in many work conditions of stopping pump by accident, starting and closing pump. According to the simulation results, the paper put forward some operation suggestions which could provide data support for the construction of water transfer project.

**Key words:** water transfer project; hydraulic transient process; water hammer; air vessel; air valve

## 1 研究背景

长距离有压输水系统在水泵启停、阀门启闭等水力过渡状态时,由于系统中水流流速和压力的突然变化,将引起输水系统内压力波的不正常变化、水柱的断裂,严重时会造成弥合水锤和管道负压。这将对输水系统的安全造成巨大威胁。目前常采用改变输水系统特性和增设辅助设施(空气阀、调压塔、空气罐等)等防护措施来确保输水系统安全。根据实际的工程情况,合理的选择和布置综合水锤防护是消除和减小水锤的有效途径<sup>[1-3]</sup>。

国内外关于水锤防护措施的研究已经相对完善。Wylie等<sup>[4]</sup>研究了有压输水管道系统水锤防护的多种装置。蒋劲等<sup>[5]</sup>通过对不同水锤防护措施进行模拟比较分析,发现在管道局部突起点附近安装单向调压塔比空气阀能更好地避免液柱分离。Bazargan-Lari等<sup>[6]</sup>利用多目标优化模型和贝叶斯网络得到了用于实时控制管道水压的阀门最优关闭

曲线。Constantin等<sup>[7]</sup>分别用空气罐和注入空气两种不同方法确定了水平输水管道极限水锤防护时,空气罐的最优含气率和管内气液两相流中的最优气体容积率。胡建永等<sup>[8]</sup>探讨了空气阀进排气系数等设计参数对空气阀的水锤防护效果的影响。水锤波速作为管道输水水力过渡过程计算的重要参数,其影响因素大多具有不确定性,现有的理论公式计算和实验数据相差较大<sup>[9]</sup>。随着城市居民供水和工业需求的提高,管道系统越来越复杂,因此开展复杂管网的水锤数值模拟研究是非常必要的。

本文以一长距离输水工程为分析对象,针对其在泵站事故断电条件下管道局部出现负压情况,提出了在相应管道处设置空气罐和空气阀的组合防护措施。通过分析空气罐和空气阀的运行特点,建立了整个输水系统的数值仿真模型,开展了系统在事故断电停泵、水泵启动和关闭等多种工况下的水锤压力分布规律研究。

## 2 仿真模型

一工厂生产用水引水水源经两次泵站提水加压后,通过压力管道输水至该工厂的高位水池。引水工程主要包括取水工程、一级加压泵站、二级加压泵站、输水管道及高位蓄水池五部分。其中一级泵站引水管段路线长 13 130m,二级泵站引水管段线路长 2 580 m。管材选择防冲刷能力强、耐压能力高的焊接钢管,输水管道经济直径为 D630,经济流速 1.10 m/s。

在一级和二级泵站处分别设置 4 台工作泵,外加一台备用泵。一、二级泵站机组转动惯量分别为  $GD^2 = 0.9 \text{ t} \cdot \text{m}^2$  和  $GD^2 = 0.22 \text{ t} \cdot \text{m}^2$  (包括水泵和电机),额定转速  $n_R$  分别为 1 480 r/min 和 2 960 r/min,额定扬程  $H_R$  分别为 155.4 和 145 m,电机功率  $P$  分别为 250 和 160 kW。水泵额定流量为 0.08  $\text{m}^3/\text{s}$ 。设计工况为一级泵站调节池水位 260 m,二级泵站调节池水位 380 m,4 台水泵全开,设计引水流量 0.31  $\text{m}^3/\text{s}$ ,总设计扬程 286 m。

考虑工程的水泵、空气罐、空气阀、管道系统等的水力边界条件,采用特征线方程构建整个输水系统的仿真计算模型。

### 2.1 特征线方程

利用特征线方法,如图 1 所示,将水流的运动方程和连续方程简化后联立求解,正负特征线方程为<sup>[1]</sup>:

$$C_+ : H_{pi} = C_p - B_p Q_{pi} \quad (1)$$

$$C_- : H_{pi} = C_m + B_m Q_{pi} \quad (2)$$

式中: $C_p$ 、 $B_p$ 、 $C_m$ 、 $B_m$  是  $t_0$  时刻的已知量。 $C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1}$ ,  $B_p = B + R | Q_{i-1} |$ ,  $C_m = H_{i+1} - BQ_{i+1}$ ,  $B_m = B + R | Q_{i+1} |$ ,  $B = \frac{a}{gA}$ ,  $R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$ 。其中,  $a$  为水击波速;  $Q$  为管道流量;  $g$  为重力加速度;  $A$  为管道横截面面积;  $H$  为测压管水头值;  $f$  为管道阻力系数;  $D$  为管道直径;  $B$ 、 $R$  为常数。

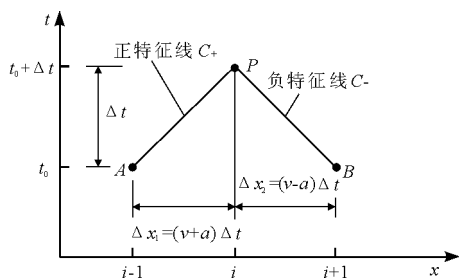


图 1 特征线示意图

### 2.2 水泵边界方程

水泵的边界方程包括水头平衡方程和惯性方程,分别用  $F_1$  和  $F_2$  表示<sup>[1]</sup>:

$$F_1 = H_s - C_m - B_m Q_R v + H_R (\alpha^2 + v^2) [A_0 + A_1 (\pi + \arctg(v/\alpha))] - h_{f_0} v |v| / \tau^2 = 0 \quad (3)$$

$$F_2 = (\alpha^2 + v^2) [B_0 + B_1 (\pi + \arctg(v/\alpha))] + \beta_0 - [GD^2 / (60\Delta t)] \cdot (n_R / T_R) (\pi/g) (\alpha_0 - \alpha) = 0 \quad (4)$$

式中:  $H_s$  为水泵上游水位;  $Q_R$ 、 $H_R$ 、 $T_R$ 、 $n_R$  分别为水泵额定流量、额定扬程、额定转矩及额定转速;  $\alpha$  和  $v$  分别为泵的无量纲转速和流量;  $\alpha_0$  和  $\beta_0$  分别表示上一时段泵的无量纲转速和转矩;  $h_{f_0}$  为阀门全开时的水头损失;  $\tau$  为阀门的无量纲开度系数;  $GD^2$  为机组转动惯量;  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $B_0$ 、 $B_1$  为水泵全特性曲线的差值系数。

### 2.3 空气罐边界条件

空气罐利用罐内密封气体的可压缩膨胀性,能有效地吸纳和消除瞬态超额压力波的能量,抑制负压和超额正压的产生,防止管道水柱分离。空气罐边界水力参数满足<sup>[10]</sup>:

$$P_s V_s = \text{const} \quad (5)$$

$$Q_1 = Q_s + Q_2 \quad (6)$$

$$y_p = \left( \frac{P}{\gamma} - h_b \right) + h_s \quad (7)$$

$$h_s = h_{s_0} + \frac{(Q_{s_0} + Q_s) dt}{2A_s} \quad (8)$$

以及正负特征方程(1)、(2),式中  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为空气罐上游管道和下游管道的流量;  $Q_s$ 、 $h_s$ 、 $A_s$ 、 $P_s$ 、 $V_s$  分别表示空气罐的流量、水位、过流面积、罐内空气压强和空腔体积;  $y_p$  为空气罐内水头。

### 2.4 空气阀边界条件

空气阀是利用空气的缓冲作用,当管线压力急剧下降时,空气阀迅速进气,隔断水锤传播路线,避免输水管道发生液柱分离而导致的破坏。流过空气阀的气体处于一维等熵变化过程,根据空气流进、流出空气阀速度不同,空气阀边界条件分为 4 种情况,分别如下<sup>[11]</sup>。

(1) 管道压力降至当地大气压,空气流进管道

$$m_q = C_{in} A_{in} \sqrt{7p_0 \rho_0 \left[ \frac{p}{p_0} \right]^{1.4286} - \left[ \frac{p}{p_0} \right]^{1.7143}} \quad (9)$$

$$p_0 > p > 0.528p_0$$

(2) 空气以临界速度流入

$$m_q = C_{in} A_{in} \frac{0.686}{\sqrt{RT_0}} p_0 \quad p_0 \leq 0.528p_0 \quad (10)$$

(3) 空气以亚声速流出

$$m_q = -C_{out}A_{out}P \sqrt{\frac{7}{RT} \left[ \left( \frac{P_0}{p} \right)^{1.4286} - \left( \frac{P_0}{p} \right)^{1.7143} \right]}$$

$$\frac{P_0}{0.528} > p > P_0 \quad (11)$$

(4) 空气以临界速度流出

$$m_q = -C_{out}A_{out} \frac{0.686}{\sqrt{RT_0}} p \quad p > \frac{P_0}{0.528} \quad (12)$$

式中： $m_q$  为空气质量流量，kg/s； $C_{in}$ 、 $C_{out}$  为空气阀进排气流量系数； $A_{in}$ 、 $A_{out}$  为空气阀进排气流面积， $m^2$ ； $R$  为气体常数，8.31 J/(mol·K)； $\rho_0$  为大气密度， $kg/m^3$ ； $p$ 、 $P_0$  为管内压力与当地大气压力，Pa； $T$ 、 $T_0$  为管内外温度，K。

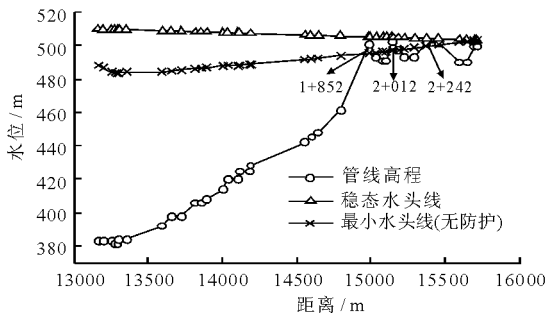


图2 无防护措施二级泵站后管线水头线

### 3.2 采取水锤防护时水力计算

模拟结果表明该长距离输水管路在事故停泵工况下的突出问题是管线负压，主要出现二级泵站后管线起伏的区域。为避免设计工况下管路负压的出现，在上述桩号适当位置处设置空气阀，依次分别称为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>空气阀。空气阀进气、排气孔直径4 cm，空气阀处水压力小于等于2.0 m时，空气阀开始进气。由于输水工程长度较大，为了保证安全，一级泵站后设置空气罐。空气罐直径2.0 m，高4.5 m，空气室PV值5.77 MPa·m<sup>3</sup>。

采用水锤防护措施后，对整个管道系统在不同条件下事故停泵，出口阀门拒动、水泵启动、水泵正常停机过程管道水锤压力变化规律进行分析，仿真模拟计算结果如下。

(1) 设计工况下事故停泵，出口阀门拒动。考虑水锤防护措施后，所有泵站事故断电停泵时，计算结果见图3~5。从图中可知：设置空气罐和空气阀后，受空气罐影响，二级泵站压力管道沿程水位均有不同程度的上升；2<sup>#</sup>空气阀所处位置的最小水压力由之前的-5.57 m变为1.15 m，并且整个管线未出现真空区域。事故停泵过程仿真模拟中，1<sup>#</sup>空气阀

## 3 过渡过程水锤计算与分析

### 3.1 无水锤防护措施水力计算

为了对比分析采用防护措施前后的管道水锤压力的差异，先对未采用水锤防护措施的管道系统进行计算。该输水系统最危险的工况为设计工况下一、二级泵站所有运行水泵同时断电事故停泵，且出口阀门拒动。经仿真模型计算，无水锤防护措施下，由于一级泵站的水泵转动惯量较大，一级泵站后管线没有出现负压，但二级泵站后管线将会有三处出现负压，分别在桩号1+852、2+012和2+242（均以二级泵站为起点）附近，最大负压出现在桩号2+012处，为-5.57 m，具体结果见图2。

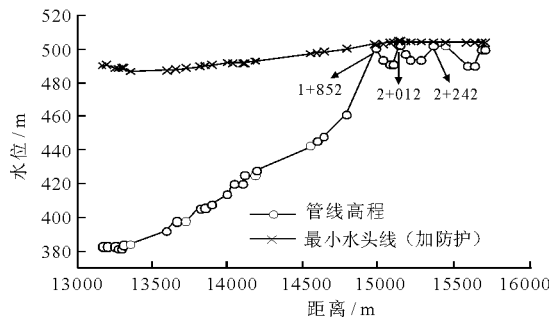


图3 防护后二级泵站后管线水头线

在水头压力小于2.0 m时打开进气，随后排气并关闭；2<sup>#</sup>空气阀由于稳定水头压力为1.75 m，小于2.0 m，故将一直处于打开状态而进气；3<sup>#</sup>空气阀处水头压力一直大于2 m，没有进入工作状态。可见，空气阀和空气罐的设置有效地抑制了管路负压的出现，起到了明显的水锤保护作用；所建立的仿真模型可以准确的模拟水力过渡过程中空气阀和空气罐的防水锤特性。

(2) 不同流量下事故停泵，出口阀门拒动。为了更加全面地分析事故停泵时管道系统的水锤压力变化规律，对设计水位不同初始流量引水系统事故断电，出口阀门拒动水力瞬变过程进行模拟计算。其中管道最小水压力统计见表1，泵站转速时程和最高、最低水压力线见图6、7。

表1 管道最小水压力统计表

初始流量	一级泵站压力管	二级泵站压力管
0.31	2.35	1.51
0.24	15.53	1.69
0.16	26.49	2.99
0.08	33.06	4.63

计算结果表明,事故停泵工况下,随着系统初始引水流量的减小,引水系统的最小水压力是升高的,水泵的最高倒转转速增大,达到最高倒转转速所需时间减少。当初始引水流量为  $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$  时,系统中出现最高水压力;当初始引水流量为  $0.31 \text{ m}^3/\text{s}$  时,系统中出现最低水压力。

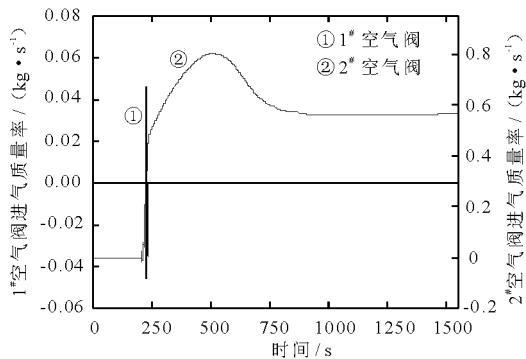


图 4 空气阀进气质量率时程

(3)水泵启动水力计算。水泵启动过程中将会引起正水锤,计算过程中,忽略水泵逐台启动的间歇时间,假设系统流量在启动时间内由 0 线性变化至目标引水流量  $0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ ,启动时间分别为 10、30 和 60 s。计算结果见图 8,不同目标引水流量下 60 s 启动的计算结果见图 9。

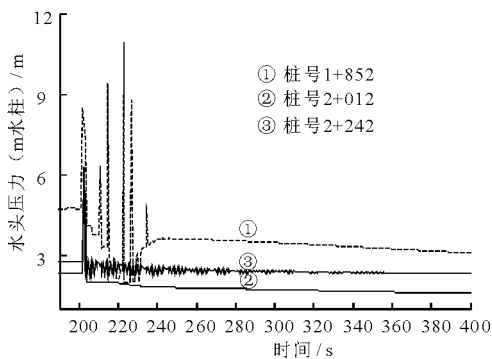


图 5 二级泵站三桩号处水头时程线

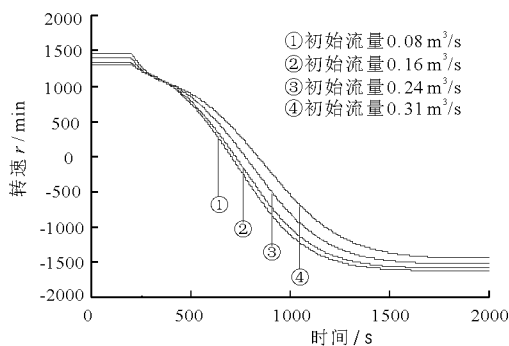


图 6 不同初始流量下一级泵站转速时程

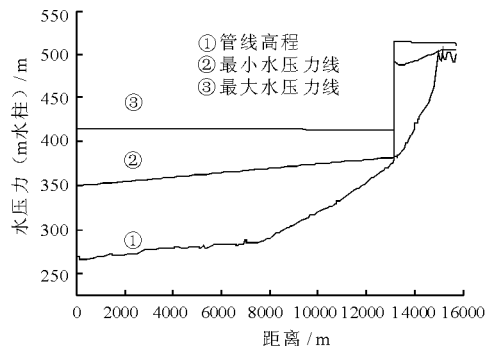


图 7 事故断电工况下最高、最低水压力线

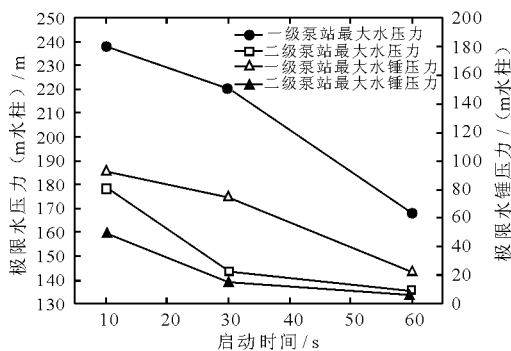


图 8 泵站后压力和水锤随启动时间变化线

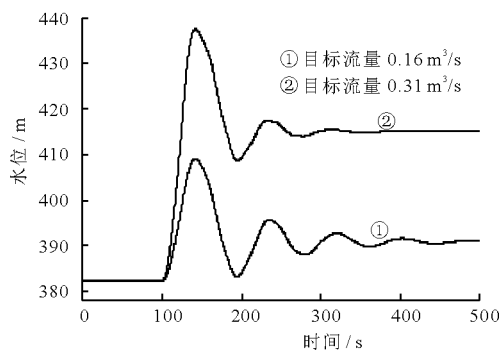


图 9 不同目标流量,60s启动一级泵站出口断面水位时程

目标流量相同,随着启动时间的延长,启动过程中管道最大水压力减小,启动水锤减小。适当延长启动时间可以减小水压力振荡幅度。启动时间相同,目标流量减小,管道系统中的最大水压力减小,启动水锤减小。

(4)正常停泵水力计算。正常停泵比事故停泵引起的水锤小,在停泵过程中会产生一定的负水锤,

计算过程中,忽略水泵逐台关闭的间歇时间,同样假设系统流量在停泵时间为线性变化。停泵时间分别取 10、20、30 和 60 s。管道压力最小值见表 2。

在设计流量,当蝶阀关闭时间为 10 s 时,一级泵站管道系统没有负压出现,二级泵站后管道由于蝶阀关闭速度太快而出现较大负压。增大阀门关闭时间,管道最小水压力随之增大。阀门关闭时间为

20 s时二级泵站管道最小水压力为 1.83 m,因此二级泵站阀门关闭时间安全起见应该大于 20 s。停泵时间相同,当前流量越大管道压力越小。随着停泵时间的延长,停泵过程中管道中最小水压力逐渐增大,水压力震荡幅度减小。

表 2 正常停泵管道压力最小值  $m^3/s, s, m$

时间	流量 0.16		流量 0.31	
	一级泵	二级泵	一级泵	二级泵
20	26.46	2.41	2.30	1.83
30	26.47	3.53	2.30	1.86
60	26.51	4.64	2.33	1.88

## 4 结 语

结合一长距离输水工程,建立了能够综合考虑空气罐和空气阀等防护措施的水力过渡过程仿真计算模型。主要结论如下:在长距离有压输水管道中,事故断电停泵工况时管道的最大水锤压力是由管道压力过低而出现水柱分离再弥合引起的撞击水锤;空气罐能降低水锤压力,防止出现液柱分流和断流弥合水锤;空气阀能够排除管路中的有害气体和抑制管线负压;建立的能够综合考虑空气罐和空气阀的水力过渡过程仿真模型能够较好的模拟长距离输水工程的各种运行状态,为输水工程安全运行提供数据支持。

### 参考文献:

[1] 陈壁宏,周发毅. 水电站和泵站水力过渡流[M]. 大连:

大连理工大学出版社,2001.

[2] 郑源,刘德有,张健,等. 有压输水管道系统气液两相瞬变流研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(6):1-5.

[3] 马世波,张健. 长距离输水工程停泵水锤防护措施研究[J]. 人民长江,2009,40(1):85-86+99.

[4] Wylie E B, Streeter V L, Suo L Streeter. Fluid transient in systems[M]. Englewood Cliffs, N J:Prentice Hall,1993.

[5] 蒋劲,赵红芳,李继珊. 泵系统管线局部凸起水锤防护措施的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2003,31(5):65-67.

[6] Bazargan-Lari M R, Kerachian R, Afshar H, et, al. Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2013,27(1):215-225.

[7] Constantin A, Nitescu C S. Simulation of water hammer phenomenon in a pumping discharge duct protected by air[C]//. Latest trend on computer, 14th WSEAS international conference on computers, Corfu, Greece, 2011. 1.

[8] 胡建永,张健,索丽生. 长距离输水工程中空气阀的进排气特性研究[J]. 水利学报,2007,38(S1):340-345.

[9] 刘志勇,刘梅清. 空气阀水锤防护特性的主要影响参数分析及优化[J]. 农业机械学报,2009,40(6):85-89.

[10] 兰刚,蒋劲,李东东,等. 空气罐在长距离输水管线水锤防护中的应用[J]. 水电站机电技术,2013,36(4):42-44.

[11] 毛艳艳,闫观清,毛艳民,等. 空气阀在长距离供水工程水锤防护中的作用[J]. 人民黄河,2011,33(12):123-125.

(上接第 11 页)

归因,科学遴选有效适宜的水土保持措施是未来研究的重要科学问题和开展窟野河流域治理的重要前期工作。

### 参考文献:

[1] 姚文艺,徐建华,冉大川等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.

[2] 张建云,章四龙,王金星,李岩. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展,2007,18(2):230-234.

[3] 徐建华,李晓宇,陈建军,等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持工程对暴雨洪水泥沙影响研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.

[4] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州:黄河水利出版社,2000.

[5] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京:水利水电出版社,2008.

[6] 王国庆,贾西安,陈江南,等. 人类活动对水文序列的显著影响干扰点分析——以黄河中游无定河流域为例[J]. 水资源与水工程学报,2001,12(3):13-15.

[7] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. 水科学进展,2011,22(3):307-314.

[8] 穆兴民,王文龙,徐学选. 黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J]. 水利学报,1999,30(2):71-75.

[9] 王国庆,兰跃东,张云等. 黄土丘陵沟壑区小流域水土保持措施的水文效应[J]. 水土保持学报,2002,16(5):87-89.