

DOI: 10.11779/CJGE201910008

# 小流域淤地坝系的溃决洪水分析

张幸幸, 陈祖煜

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 中国黄土高原建成了数量众多的淤地坝, 形成了大量的小流域坝系。当坝系的空间分布不合理时, 一坝溃决往往引起下游坝连锁溃决。为了合理评价坝系的整体防洪能力, 提出了一套模拟暴雨引起淤地坝坝系连锁溃决过程的方法。定义了坝系中坝的分级规则, 提出了一种自动确定每座坝分级的方法。根据坝的分级从低到高的次序, 依次对坝系中的每座坝进行产流分析、水库调蓄分析、溃坝判别和溃坝洪水分析, 从而模拟坝系的连锁溃决过程。基于上述方法编制了计算程序, 对陕西省绥德县的王茂沟小流域坝系的连锁溃决问题进行了模拟, 并结合有关淤地坝水毁调查资料对模拟结果进行了分析。

**关键词:** 淤地坝; 小流域坝系; 溃坝; 暴雨; 洪水

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1845-09

**作者简介:** 张幸幸(1985—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事土石坝安全、土工数值分析方面的研究工作。E-mail: zhangxx@iwhr.com。

## Breach flood analysis of warping dam system in small watersheds

ZHANG Xing-xing, CHEN Zu-yu

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** A large number of warping dams, which have formed lots of dam systems in small watersheds, have been built in the Loess Plateau of China. When the layout of a dam system is inappropriate, breach of one dam usually causes chain failure of the downstream dams. In order to properly evaluate the flood control capacity of a whole warping dam system, a method to simulate the chain breach process of warping dam systems caused by rainstorm is proposed. A grading rule for dams in a system is defined, and a method for automatically determining the grade of each dam is put forward. According to the grade, from low to high, the runoff yield analysis, storage analysis, dam-breach judgment and dam-breach flood analysis are carried out sequentially for each dam to simulate the chain failure process of a dam system. These methods are implemented in a program and is used to simulate the chain breach process of the Wangmaogou warping dam system in Suide County, Shaanxi Province, China, and the results are discussed in comparison with the investigated flood damage in July 2012.

**Key words:** warping dam; dam system in small watershed; dam breach; rainstorm; flood

## 0 引言

淤地坝是指在水土流失区小流域沟道中建造的以滞洪拦沙和淤地造田为目的的水土保持工程, 其坝型以土石坝为主。淤地坝建设具有悠久的历史, 明代万历年间就有筑坝淤地的记载, 新中国成立后, 经历了鼓励群众打坝淤地(20世纪50—70年代)、政府有组织的建设骨干治沟工程(20世纪80年代至21世纪初)、集中连片推进小流域坝系治理工程(21世纪以后)3个阶段, 在黄土高原地区建成了大量的淤地坝, 形成了大量的小流域坝系。截至2011年, 青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西和陕西6个省(自治区)淤地坝总量达56065座<sup>[1-3]</sup>。

由于淤地坝本身设计防洪标准不高, 除骨干坝外, 大部分淤地坝没有泄洪设施, 在暴雨条件下, 淤地坝的水毁现象时有发生。有关资料<sup>[4-7]</sup>显示: 1973年8月25日, 陕西省延川县降暴雨112 mm, 当地7570座淤地坝损毁3300座; 1977年7月—8月黄河中游地区两次普降暴雨, 甘肃省庆阳地区、陕西省榆林和延安地区、山西省西部28个县, 不同程度地损毁淤地坝3.27万座; 1994年7, 8月, 陕北榆林、延安地区许

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401603); 国家自然科学基金项目(41731289); 中国水科院基本科研业务费项目(GE0145 B562017)

收稿日期: 2018-08-29

多县遭受暴雨、洪水等灾害,不同程度地损毁淤地坝7347座;2000年7月8日,山西离石王家沟流域出现较大暴雨,流域内24座淤地坝中的7座不同程度地损毁;2012年7月15日,陕西省绥德县遭遇暴雨,暴雨中心出现在王茂沟流域,韭园沟流域内共有24座淤地坝不同程度地损毁。

超标准暴雨洪水是引起中、小型淤地坝水毁溃坝的主要原因。但一些流域坝系缺少一定数量上拦下保的治沟骨干坝,或者骨干坝分布不合理,导致坝系整体抗洪能力较弱,往往一坝溃决,引起连锁溃坝。20世纪70年代、90年代的大规模淤地坝水毁事件多与坝系整体的抗洪能力不足有关。因此,对淤地坝坝系在暴雨洪水条件下的抗洪风险进行分析,预测可能发生的连锁溃决,对改进淤地坝系的规划设计、指导防洪除险加固、制定应急方案等,都有十分重要的意义。

坝系是一个复杂的系统,坝系内的坝之间往往存在复杂的串联、并联关系。为了便于对这种复杂的系统进行分析,本文规定了坝系中坝的分级规则,并建议了一种对坝系空间拓扑关系进行分析,自动确定每一座坝分级的方法。按照分级从低到高的次序,依次对坝系中每一座坝进行分析,可显著提高分析效率。笔者按照这一思路编制了计算程序,程序由坝系的空间拓扑分析和单坝分析两个主要模块组成。坝系的拓扑分析模块可以自动确定坝系中每一座坝的分级,并按照分级对坝系中的坝进行排序。单坝的分析模块包括区间流域产流计算、入库流量计算、水库调蓄计算、溢洪道泄流计算、溃坝判断和溃坝过程计算等功能。

为了便于叙述,以陕北韭园沟流域内的王茂沟坝系为例,叙述小流域淤地坝系连锁溃决分析的方法,并结合实际水毁调查资料对模拟结果进行分析。韭园沟流域属于陕西省榆林市绥德县管辖,位于无定河中游左岸,地理位置位于东经 $110^{\circ}16'$ — $110^{\circ}26'$ ,北纬 $37^{\circ}33'$ — $37^{\circ}38'$ 之间,截至2006年,流域内共有淤地坝211座。王茂沟是韭园沟中段南侧的一条支沟,流域面积约为 $5.96\text{ km}^2$ ,根据2008年数据,其内有淤地坝22座,包括骨干坝2座、中型坝5座、小型坝15座,形成一个典型的小流域坝系,如图1所示<sup>[8]</sup>。王茂沟坝系中每一座坝的主要参数列于表1。

## 1 坝系空间拓扑的描述和分析方法

### 1.1 坝的分级规则

坝系中坝的分级规则定义如下:上游再无坝的坝定义为1级坝,1级坝的下游为2级坝,2级坝的下游为3级坝,……,以此类推。如果一座坝上游与其直接相连的坝中,最大的级别为 $n$ ,则本级坝的级别为 $n+1$ 。

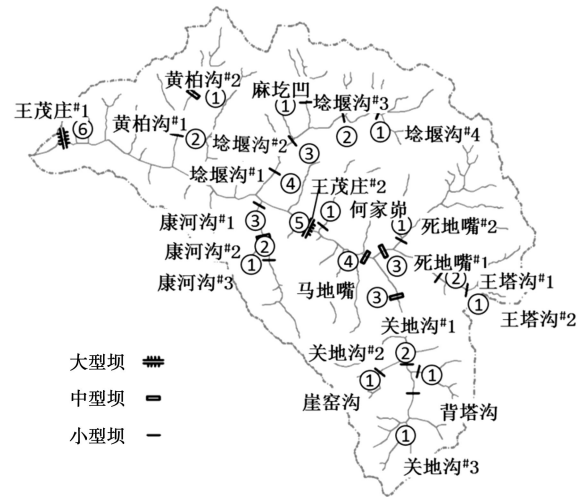


图1 王茂沟小流域坝系总体布置图

Fig. 1 Layout of dam systems in Wangmaogou small watershed

表1 王茂沟流域淤地坝的坝体和水库特征参数

Table 1 Characteristic parameters of dam and reservoir of warping dams in Wangmaogou watershed

编号 ID	区间流 域面积 $A/\text{km}^2$	剩余库容 $V_w/\text{万 m}^3$	平均水面 面积 $b/\text{m}^2$	有效坝高 $H_w/\text{m}$
1	1.094	10.630	67707.0	1.57
2	0.713	42.860	35131.1	12.20
3	0.163	1.500	4261.4	3.52
4	0.186	0.240	1318.7	1.82
5	0.066	0.390	2407.4	1.62
6	0.083	1.700	4696.1	3.62
7	0.251	0.048	2400.0	0.20
8	0.133	4.800	5607.5	8.56
9	0.166	0.170	5666.7	0.30
10	0.239	2.365	4420.6	5.35
11	0.254	0.055	1833.3	0.30
12	0.16	0.070	3500.0	0.20
13	0.067	0.092	593.5	1.55
14	0.148	5.950	12344.4	4.82
15	0.477	5.700	24782.6	2.30
16	0.138	0.067	1675.0	0.40
17	0.065	0.090	2571.4	0.35
18	0.325	0.035	760.9	0.46
19	0.408	21.100	24478.0	8.62
20	0.097	0.200	1333.3	1.50
21	0.529	0.300	1250.0	2.40
22	0.195	0.050	1666.7	0.30

“直接相连”指两座坝中间没有其他坝相隔。

为了便于理解,在图1中将所有坝的分级以圆圈内的数字标出。王茂沟的源头附近,关地沟#3坝、背塔沟坝和崖窑沟坝均上游都再没有其他坝,因此为1级坝;关地沟和背塔沟交汇点下游的关地沟#2坝,其上游与其直接相连的坝为关地沟#3坝和背塔沟坝,均为1级坝,因此关地沟#2坝为2级坝;崖窑沟与关地沟交汇点下游的关地沟#1坝,上游与其直接相连的坝为关地沟#2坝和崖窑沟坝,分别为2级坝和1级坝,因此关地沟#1坝为3级坝。整个坝系中级别最高的坝为王茂庄#1坝,分级为6级,控制着整个流域的出口。

### 1.2 坝系空间拓扑的输入和分析

当坝系规模较大时, 人工对坝系中的每一座坝进行分级工作量较大, 且容易出现错误。因此, 程序不要求人工输入坝的分级, 而是要求对流域中的每一座坝赋予唯一的编号 (ID), 输入时只需输入每一座坝下游与其直接相连的坝的编号。以王茂沟坝系为例, 将表 2 的第 3 列信息输入即可。如果一座坝下游没有坝, 则其“下游坝的编号”输入“0”。

表 2 王茂沟坝系空间拓扑的输入信息

Table 2 Input topological information of Wangmaogou dam system

名称	坝的编号 (ID)	下游坝的编号 (LD)
王茂庄#1 坝	1	0
王茂庄#2 坝	2	1
黄柏沟#1 坝	3	1
黄柏沟#2 坝	4	3
康河沟#1 坝	5	1
康河沟#2 坝	6	5
康河沟#3 坝	7	6
埝堰沟#1 坝	8	1
埝堰沟#2 坝	9	8
埝堰沟#3 坝	10	9
埝堰沟#4 坝	11	10
麻圪凹坝	12	9
何家峁坝	13	2
马地嘴坝	14	2
死地嘴#1 坝	15	14
死地嘴#2 坝	16	15
王塔沟#1 坝	17	15
王塔沟#2 坝	18	17
关地沟#1 坝	19	14
关地沟#2 坝	20	19
关地沟#3 坝	21	20
背塔沟坝	22	20

读入表 2 第 3 列的输入信息后, 程序将自动对坝系的空间拓扑进行分析, 分析得到的结果包括每一座坝的分级及其上游与其直接相连的坝的数量和编号, 如表 3 所列。对坝系空间拓扑的分析可以通过小程序实现, 对应的 matlab 程序见本文后的附录。

## 2 单坝的分析方法

### 2.1 入库流量的计算

假设一座坝的编号为  $i$ , 其上游坝的数量为  $NLU^i$ 。显然当编号为  $i$  的坝为 1 级坝时,  $NLU^i=0$ , 此时, 如果忽略汇流过程,  $t_1 \sim t_2$  时段内, 该座坝入库的流量等于该段时间内降雨产生的净雨深与该坝控制的区间流域面积的乘积, 即

$$q_{in}^i = A^i R_{t_1 \sim t_2} \quad (1)$$

式中,  $q_{in}^i$  是编号为  $i$  的坝的入库流量,  $A^i$  是编号为  $i$  的坝的控制的流域面积,  $R_{t_1 \sim t_2}$  是  $t_1 \sim t_2$  时段内降雨产生的净雨深。

表 3 王茂沟坝系空间拓扑分析结果

Table 3 Topological analysis results of Wangmaogou dam system

ID	坝的分级 (RANK)	上游坝的数量 (NLU)	上游坝的编号 (LU)
1	6	4	2, 3, 5, 8
2	5	2	13, 14
3	2	1	4
4	1	0	
5	3	1	6
6	2	1	7
7	1	0	
8	4	1	9
9	3	2	10, 12
10	2	1	11
11	1	0	
12	1	0	
13	1	0	
14	4	2	15, 19
15	3	2	16, 17
16	1	0	
17	2	1	18
18	1	0	
19	3	1	20
20	2	2	21, 22
21	1	0	
22	1	0	

如果编号为  $i$  的坝不是 1 级坝, 即  $NLU^i > 0$ , 则该座坝的入库流量为本座坝控制区间流域产流与其上游坝的泄流量之和, 即

$$q_{in}^i = A^i R_{t_1 \sim t_2} + \sum_{k=1}^{NLU^i} \left( \int_{t_1}^{t_2} q_{out}^k dt \right) \quad (2)$$

中国淤地坝主要分布在青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西和陕西 6 省的干旱、半干旱地区, 以超渗产流为主, 可参照陕北模型<sup>[9]</sup>进行计算。假设降雨强度为  $I$ , 下渗能力为  $F$ , 则  $t_1 \sim t_2$  时段内的产流量为

$$R_{t_1 \sim t_2} = \int_{t_1}^{t_2} \text{sgn}(I - F) dt \quad (3)$$

式中,  $\text{sgn}(x)$  是一个符号函数, 定义为

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

下渗能力  $F$  可以根据霍尔顿下渗曲线确定, 有

$$F = F_c + (F_0 - F_c) \exp(-Kt) \quad (5)$$

式中,  $F_0$ ,  $F_c$  和  $K$  分别为霍尔顿下渗模型的 3 个参数, 分别为初始下渗率、稳定下渗率和土壤特性参数。

### 2.2 常态下出库流量的计算

当淤地坝未发生溃决时, 理论上下泄流量为泄洪建筑物通过的流量和放水建筑物通过的流量之和。淤地坝的放水建筑物包括卧管、竖井和涵洞 3 种, 泄洪建筑物以溢洪道为主。通常情况下, 放水建筑物断面尺寸较小, 过流能力并不能满足泄洪的要求。一些淤地坝水毁案例中, 放水竖井或涵洞成为了导致溃坝的薄弱环节。

对于暴雨洪水引起的溃坝问题, 可忽略放水建筑物的过流能力, 而主要考虑泄洪建筑物的泄洪能力。

溢洪道的泄洪能力按照下式计算<sup>[10]</sup>:

$$Q_d = CB_s(H - z_s)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

式中,  $Q_d$ 为泄洪流量,  $C$ 为综合流量系数, 在 1.42~1.62 之间取值,  $B_s$ 为流堰的顶宽,  $H$ 为库水位,  $z_s$ 为溢流堰顶高程。

根据 2008 年的数据, 王茂沟坝系中, 仅王茂庄#1 坝有溢洪道, 溢洪道顶宽 6.55 m, 深约 3.5 m。对没有泄洪建筑物的淤地坝, 认为其下泄流量为 0。

### 2.3 溃坝状态的判断

常规土石坝的溃决可能由库水漫顶或渗透破坏(如管涌)引起, 后者并不一定发生在暴雨洪水条件下。而淤地坝平时是不蓄水的, 其溃决多因暴雨洪水引起, 其形式包括漫顶溃决和沿溢洪道、放水建筑物的冲刷破坏<sup>[11]</sup>。对于后面的这种破坏型式, 目前还没有很好的判别和模拟方法。因此, 本文的计算程序目前只考虑了漫顶溃决这一种模式, 根据库水位  $H$  与坝顶高程  $z_c$  的关系来判断淤地坝是否溃决: 如果  $H > z_c$  则判定淤地坝溃决, 启动溃坝计算; 否则认为淤地坝仍处于安全状态, 下泄流量取决于泄洪建筑物的下泄流量。

### 2.4 溃坝计算

计算溃坝洪水的模型可以分为基于统计经验的模型和基于物理过程的模型两大类。前者通过对溃坝案例和溃坝试验的有关数据进行总结统计, 得出计算溃坝峰值流量、溃坝洪峰出现时刻、溃口尺寸的经验公式, Foster 等<sup>[12]</sup>、Xu 等<sup>[13]</sup>、Froehlich<sup>[14-15]</sup>都提出过这样的模型; 后者考虑溃口水流、溃口冲刷和溃口扩展过程, 代表性的计算程序包括 BREACH、NWS DAMBRK 等<sup>[16]</sup>、MIKE11<sup>[17]</sup>、DB-IWHR 等<sup>[18-19]</sup>。这两类模型都有各自的优点和局限性。理论上, 基于物理过程的模型反映了溃坝的物理本质, 计算结果更为合理, 但计算过程较为复杂, 模型参数较多; 基于统计的经验模型可以根据少量的坝体和水库的特性参数直接计算出溃坝洪水的特征值(如洪峰流量、洪峰出现时刻等), 使用起来更为方便, 但精度较差。

需要注意的是, 绝大多数基于经验的溃坝模型是基于水库溃坝的案例总结的, 大都将水库库容作为溃坝洪量。然而, 淤地坝是一种水土保持工程, 平时是不蓄水的, 导致坝系连溃的洪水主要来自暴雨山洪, 而非水库本身的存水; 对于运行了一段时间的淤地坝坝系, 大量的淤地坝已经接近淤满, 库容在溃坝洪水中所占的比例将更小; 在连锁溃决过程中, 一座坝溃决的下泄洪水总量不仅包含本座坝蓄滞的洪水, 还包括上游坝溃决的下泄的洪水。因此, 对淤地坝连锁溃决问题, 不能直接套用基于水库溃坝经验总结的溃坝

模型。基于上述原因, 程序选用了基于物理过程的溃坝模型 DB-IWHR, 在其基础上做一定简化, 来模拟淤地坝的溃坝过程。

DB-IWHR 模型<sup>[18-19]</sup>是陈祖煜等提出的一个基于物理过程的溃坝模型, 其主要特点: ①溃口流量计算采用宽顶堰堰流公式; ②提出溃口侵蚀率的双曲线冲刷模型, 描述溃口冲刷过程; ③基于边坡稳定计算模拟溃口的侧向扩展过程, 根据实际需要, 也可将溃口形状简化为梯形。该模型最早是针对堰塞坝的溃决问题提出的, 后来在人工填筑土石坝的溃决模拟中也得到了较好的应用<sup>[20-21]</sup>。

计算实践表明, 双曲线侵蚀模型相比国外常用的指数侵蚀模型具有更好的数值稳定性<sup>[18]</sup>。这两种侵蚀模型都将侵蚀速率定义为剪应力的函数, 这在物理上是合理的。但在实际使用时, 溃口床面作用的剪应力无法直接获得, 需要根据流速、河床糙率、水深等参数计算。淤地坝的坝高不高, 溃口水深大都不超过 3 m, 溃口平均流速一般小于 5 m/s, 在这一范围内, 侵蚀速率与水流平均流速之间的关系大致接近线性。因此, 本程序采用更为简化的处理方式, 认为溃口向下扩展的速率与溃口流速之间存在线性关系, 即

$$\frac{dz}{dt} = \lambda(v - v_c), \quad (7)$$

式中,  $\lambda$ 为模型参数,  $v$ 为溃口流速,  $v_c$ 为坝体颗粒的启动流速。在合理确定参数的前提下, 采用式(7)或双曲线模型, 模拟得到的溃口流量过程线略有差别, 但差别不大。

DB-IWHR 程序的使用指南<sup>[22]</sup>对不同类型的土建议了双曲线模型参数的取值范围。陕北淤地坝主要为黄土填筑的均质坝, 从颗粒级配上可归为“粉土”, 黏性颗粒含量很少。根据国外的试验经验<sup>[23-25]</sup>, 粉土属于“极易侵蚀”的土, 相比于黏性土, 粉土的抗侵蚀性能受压实度的影响较小。因此, 在资料缺乏的情况下, 对于采用颗粒级配相近的无黏性均质土坝, 可以近似地采用同一组侵蚀模型参数。工程界一般认为淤地坝漫顶即引起溃坝, 因此取  $v_c = 0$  m/s。

淤地坝一般坝高不高, 运行了一段时间的淤地坝库内常形成大面积平整的坝地, 可视为宽浅型的水库。基于此, 可将淤地坝的库容曲线简化为直线, 即

$$V_w = b(H - H_r), \quad (8)$$

式中,  $H$ 是水位,  $H_r$ 是已淤高程,  $V_w$ 是对应水位  $H$  的库容,  $b$ 是水库的平均水面面积。

简化后的 DB-IWHR 模型仍一共需要输入 9 个计算参数, 除了  $\lambda$ ,  $b$  和  $H_r$  外, 还需输入溃口流量系数  $C$ 、跌落系数  $m$ 、溃口的初始宽度  $B_0$ 、溃口的初始和最终侧跛脚  $\beta_0$  和  $\beta_{end}$  以及溃口的最终高程  $z_{end}$ 。

淤地坝属于一种“低成本”的工程, 单座淤地坝的造价仅为几万元到几十万元, 大部分淤地坝没有条件开展筑坝材料的岩土试验。同时, 目前对淤地坝溃坝洪水的监测还不充分, 仅有部分淤地坝能够根据水毁后的洪痕粗估峰值流量。在目前的条件下, 想要精确的确定每座淤地坝的 DB-IWHR 模型参数是比较困难的。好在 DB-IWHR 模型除侵蚀模型参数和库、坝的几何特征参数外, 溃坝峰值流量对其他参数的敏感度都不是太高。DB-IWHR 程序的使用指南<sup>[22]</sup>对绝大部分参数建议了取值范围, 并建议通过反演或参数敏感性分析来进一步确定推荐的参数。因此, 本文采用如下方法来近似地确定溃坝计算所需的参数:

(1) 选择一个能够反映土石坝溃坝基本规律的经验公式, 来粗估单座淤地坝溃坝可能产生的洪峰流量;

(2) 以同条件下经验公式粗估的洪峰流量为目标, 进行参数反演, 确定连锁溃坝计算所需的 DB-IWHR 模型参数。

本文选取 Xu 等<sup>[13]</sup>基于大量土石坝溃坝案例统计结果提出的预测峰值流量的经验公式 (式 (9)), 对 22 座淤地坝分别计算满库、漫顶溃坝条件下 (不考虑坝系连锁反应) 的峰值流量:

$$\frac{Q_p}{\sqrt{gV_w^{5/3}}} = 0.133 \left( \frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{-1.276} e^{c_4}, \quad (9)$$

式中,  $Q_p$  为洪峰流量,  $g$  为重力加速度,  $V_w$  为库容 (列于表 1 的第 3 列),  $H_w$  为库前水深 (列于表 1 的第 5 列);  $c_4$  按照下式计算:

$$c_4 = b_4 + b_5, \quad (10)$$

式中,  $b_4$  反映溃坝模式, 对漫顶溃坝, 取  $b_4 = -0.788$ ,  $b_5$  反映坝体材料的抗冲蚀能力, 认为淤地坝属于“高度易侵蚀”的土石坝, 取  $b_5 = -0.089$ 。

然后, 将采用式 (9) 计算得到的 22 座坝的溃坝洪峰流量作为反演目标, 采用 DB-IWHR 模型进行反演, 得到一组参数, 作为坝系连锁分析的模型参数, 列于表 4。

## 2.5 溃坝洪水演进的处理

根据文献[8]的数据, 王茂沟流域主要支沟的长度在 0.165~1.55 km 之间, 比降在 2.5%~9%之间, 可以估算溃坝洪水在支沟中的传播时间最大也仅为十几分钟。

通常情况下, 上游水库溃坝后, 下游水库的入库流量过程宜通过洪水演进计算确定, 洪水在河道中的演进过程不仅受到河长和坡率的影响, 还受到河床断面形态、河床糙率等因素的影响。淤地坝经过一段时间运行, 河谷淤积形成平坦的坝地, 但对淤地坝水毁的调查发现, 洪水不会沿着整个河谷漫流, 而是在坝

地冲刷形成窄深的冲沟。从这个角度讲, 淤地坝系中溃坝洪水的演进计算, 不宜根据天然河谷确定流槽断面形态, 预先确定洪水演进的流槽断面形态存在一定困难。

考虑: ①小流域淤地坝系中溃坝洪水演进的河道长度较短, 洪水传播时间较短, 洪峰衰减也有限; ②淤地坝形成的水库有一定调蓄能力, 下游坝的溃口流量过程主要取决于库容曲线和入库洪水量, 对入库洪峰流量和洪水过程线形态的敏感程度不高。本文建议忽略河道洪水演进的过程, 认为下游淤地坝的入库流量等于区间流域产流量和上游水库下泄流量的叠加。

表 4 王茂沟淤地坝溃坝模型参数

名称	符号 (单位)	值
冲刷模型参数	$\lambda/10^{-3}$	3.5
溃口综合流量系数	$C/(m^{1/2} \cdot s^{-1})$	1.5
跌落系数	$m$	0.8
溃口初始宽度/有效坝高	$B_0/H_w$	1
溃口初始侧坡脚	$\beta_0/(\circ)$	135
溃口最终侧坡脚	$\beta_{end}/(\circ)$	175
淤积高程	$H_t/m$	0
溃口最终底高程	$z_{end}/m$	0

注: 溃坝模型计算结果不受高程计算起点的影响, 因此对每座淤地坝取已淤高程为高程的计算起点。

## 3 王茂沟流域坝系连锁的分析结果

### 3.1 计算条件

根据有关淤地坝水毁情况的调查资料<sup>[4]</sup>, 2012 年 7 月 15 日, 陕西省绥德县曾遭遇一场强降雨, 暴雨中心出现在王茂沟流域, 1 h 最大降雨量达到 75.7 mm。由于对这场降雨缺乏进一步精确的数据, 我们采用如图 2 所示的降雨过程进行分析, 最大降雨强度为 75 mm/h, 累计降雨深度为 131.25 mm。由于缺乏当地的降雨洪水资料的分析结果, 产流模型参数采用临近的子洲试验站的降雨下渗模型参数<sup>[26]</sup>, 取  $F_c = 0.42$  mm/min,  $F_0 = 1.8$  mm/min,  $K = 0.0538$  (对应时间单位为 min 的情况)。

### 3.2 计算结果及分析

图 3 给出了坝系中溃决的坝的数量随时间增长的情况, 并标出了溃决淤地坝的名称。图 4 (a), (b) 分别给出了开始降雨后 1 h 和降雨过程结束时, 王茂庄坝系中溃决淤地坝的分布情况。降雨 1 h 时, 此时累积降雨深达到 56.25 mm, 流域内有 12 座淤地坝漫顶溃决; 降雨结束时, 累积降雨深 131.25 mm, 流域内有 19 座淤地坝溃决, 仅有 3 座淤地坝没有遭遇漫顶。

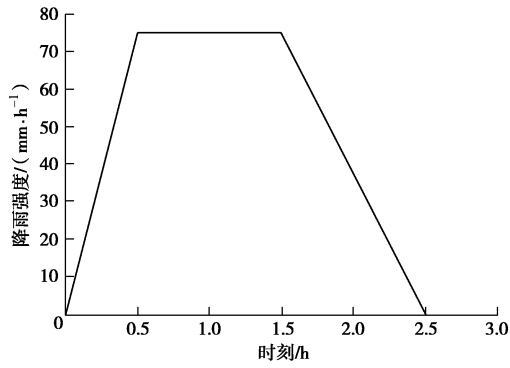


图2 计算采用的降雨过程

Fig. 2 Supposed rainfall process in simulation

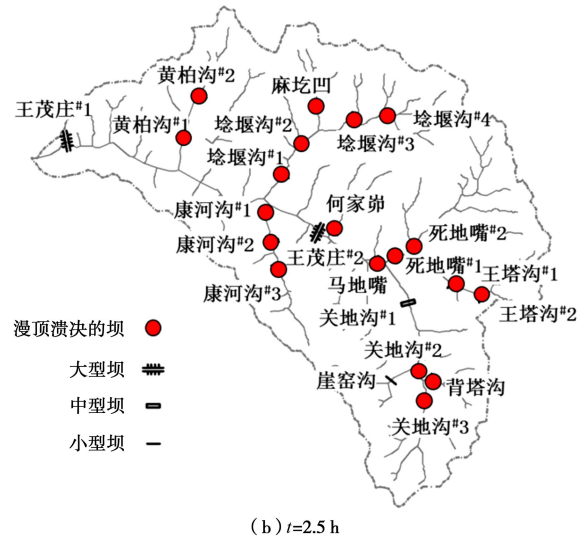


图4 漫顶溃决的坝的分布

Fig. 4 Distribution of overtopped dams

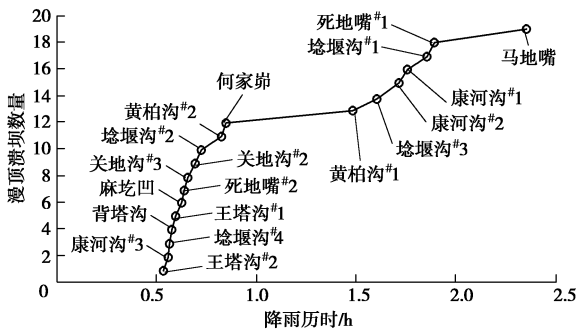


图3 漫顶溃坝数量的增长

Fig. 3 Accumulation of overtopped dams

对比图3与表1的信息可知，在没有泄洪设施的情况下，淤地坝的在降雨过程中是否容易溃决，与淤地坝的剩余库容直接相关。降雨1h时，坝系内溃决的12座淤地坝剩余库容均很小，最大仅0.3万m<sup>3</sup>；降雨历程结束后，坝系内未溃决的淤地坝，剩余库容均超过10万m<sup>3</sup>。

整个降雨过程中，王茂庄#1坝的总入库水量达到了17.059万m<sup>3</sup>，而其剩余库容仅10.63万m<sup>3</sup>，王茂庄#1坝没有漫顶溃决与溢洪道的泄洪有很大关系。图5给出了王茂庄#1坝的泄流过程。

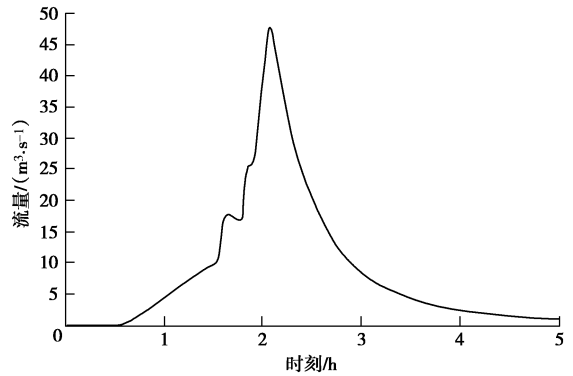
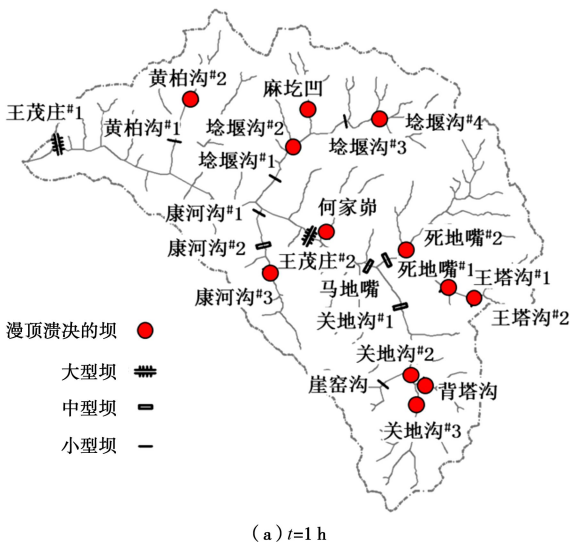


图5 王茂庄#1坝的泄流过程

Fig. 5 Out flow process of Wangmaozhuang dam No. 1

图6给出了各个淤地坝的下泄洪峰流量（未溃决的坝洪峰流量为0），除王茂庄#1坝（ID为1）的下泄流量为溢洪道下泄流量外，其余均为漫顶溃坝的溃口流量。坝系中，马地嘴坝（ID为14）的溃坝洪峰流量最大，达到311 m<sup>3</sup>/s；相当一部分剩余库容很小的淤地坝，虽然发生漫顶溃决，但峰值流量很小，有7座淤地坝溃坝洪峰流量小于10 m<sup>3</sup>/s。



(a) t=1 h

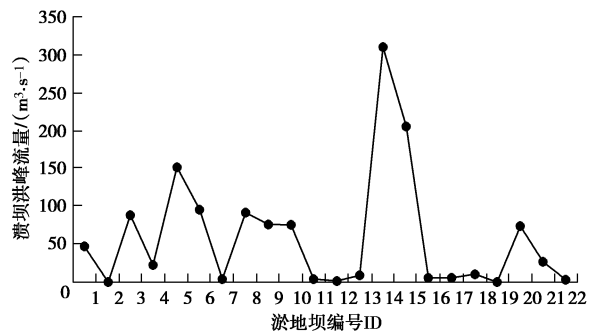


图6 淤地坝的下泄洪峰流量

Fig. 6 Peak discharge flood flow of warping dams

马地嘴坝（分级为4级，剩余库容5.97万m<sup>3</sup>）是坝系中最后一个溃决的坝，其溃决是接收了上游8



座坝溃决的洪水, 超过其拦蓄能力引起的; 马地嘴坝溃决后, 其洪水被王茂庄#2 坝(分级为 5 级, 剩余库容 42.86 万  $m^3$ ) 全部拦蓄, 没有给下游造成更为严重的后果。可以看到, 坝系中坝的级别反映了其对坝系防洪能力的影响, 级别越高的坝, 其在坝系中的“上拦下保”作用越突出, 提高高级别坝的防洪库容将有效提高整个坝系的防洪能力。

### 3.3 与水毁调查情况对比

文献[4]给出了 2012 年 7 月 15 日绥德县暴雨中韭园沟流域淤地坝的水毁调查情况, 其中王茂沟流域淤地坝水毁情况列于表 5。但由于淤地坝系处在不断的发展变化中, 文献[4]中部分淤地坝的名称和规模与本文采用的图 1 及笔者近期开展的实地调查情况有一定出入。可以确定的是, 在 2012 年 7 月 15 日的暴雨中, 淤地坝系实际水毁情况没有计算结果显示的那样严重, 仅有 9 座淤地坝部分水毁或轻微水毁。

造成这一差异的主要原因包括 2 点: ①2012 年 7 月 15 日, 韭园沟流域实测最大点降雨量为 98.4  $mm^{[1]}$ , 降雨可能分布不均, 例如王茂沟实际的累积降雨量可能更小, 而本文采用流域内等降雨量分布, 且计算中未考虑流域各位置的降雨时序, 各坝计算入库流量可能偏大; ②本文以“库水漫顶”作为淤地坝溃决的判据, 对于土石坝漫顶溃坝而言, 这是一个偏于安全、较为严苛的条件, 实际上土石坝在库水漫顶时仍有一定抗冲能力, 并非立即发生溃坝。对于本文分析的王茂沟流域, 大量小型淤地坝已经接近淤满, 即使库水漫顶, 产生的水流流量也较小, 并不一定引起溃坝。

表 5 王茂沟淤地坝 2012 年 7 月水毁情况

Table 5 Flood damage of warping dams in Wangmaogou watershed in July 2012

名称	坝型	水毁情况
关地沟#1	小型坝	坝体部分水毁
关地沟#2	小型坝	坝体部分水毁
背塔沟	中型坝	竖井、涵洞完全水毁
王塔沟#1	小型坝	坝体部分水毁
埝堰沟#1	小型坝	坝体轻微水毁
埝堰沟#2	中型坝	涵洞、卧管部分水毁
埝堰沟#3	小型坝	坝体部分水毁
康河沟#2	小型坝	坝体部分水毁
黄柏沟#1	中型坝	竖井轻微水毁

## 4 总结和讨论

本文针对小流域淤地坝系在暴雨洪水条件下的连锁溃决问题, 提出了一套分析方法, 其要点包括: ①对坝系空间拓扑进行描述和分析, 对坝系中的每座坝按拓扑关系进行分级; ②按照分级从低到高的顺序, 依次对坝系中的坝进行分析; ③每座坝的入库流量等于区间流域产流量和上游水库下泄流量的叠加, 按照

水位和坝顶高程的关系判别淤地坝是否溃决, 如发生溃决则调用溃坝分析程序进行计算, 如未发生溃决则计算常态下的下泄流量; ④采用基于物理过程的 DB-IWHR 模型模拟溃坝过程。根据这套方法, 编制计算程序对王茂沟小流域坝系的在暴雨条件下的连锁溃决过程进行了模拟。

根据对王茂沟淤地坝的分析结果, 剩余库容是决定淤地坝防洪能力的关键因素。对坝系空间拓扑进行分析的意义是明显的, 坝系中坝的等级越高, 其在整个坝系中“上拦下保”的作用越关键, 提高高级别的防洪库容将明显提高整个坝系的防洪能力。此外, 泄洪建筑物也是保证淤地坝安全的重要措施, 王茂庄#1 坝接收了远超过其剩余库容的洪水, 但其中相当部分通过泄洪建筑物下泄, 保证了大坝的安全。

从本文计算结果和有关水毁情况调查的文献资料对比看, 本文提出方法的预测结果与实际水毁情况仍有一定出入, 主要原因为: 按照漫顶即溃坝的判据, 剩余库容很小的淤地坝也会被判为溃决, 而实际情况并非如此。此外, 淤地坝的水毁情况调查显示, 除漫顶溃决以外, 沿溢洪道或放水建筑物的冲刷破坏也是淤地坝的破坏型式之一, 对于这种型式目前还没有很好的判别和模拟方法, 因此, 本文的计算程序目前只考虑了漫顶溃坝这一种型式。为了便于日后的完善, 本文开发的计算程序采用了模块化的开发方法。日后如对淤地坝单坝的溃决机理有了更进一步的认识, 只需对单坝的分析模块做相应改进即可。

本文在分析过程中忽略了区间流域内的产流、汇流过程, 以及上、下游淤地坝之间的洪水演进过程。这是由于王茂沟淤地坝系控制的总流域面积仅为 5.96  $km^2$ , 坝系内单座淤地坝控制的最大区间流域面积仅为 1.09  $km^2$ , 上、下游相邻的两座淤地坝之间沟道长度小于 1.5 km, 属于典型的小流域坝系。根据陕北地区的水文观测经验<sup>[26]</sup>, 类似规模的区间流域, 其暴雨条件下的产汇流时间通常为几分钟到十几分钟, 很少超过 30 min。同时, 由于绝大部分淤地坝没有泄洪设施, 忽略上述两个过程不会对淤地坝溃坝与否的判断及溃口流量的计算造成实质性影响, 但会导致计算预测的溃坝时刻比实际有所提前, 这从安全的角度是可以接受的。在对更大面积的淤地坝系进行分析时, 则需要根据情况进一步判断是否需要考虑区间流域内的汇流过程和洪水在河道的演进过程。

### 附: 坝系拓扑分析的程序示例

```
LD =dlmread('LD.txt'); %每座坝下游坝的编号
NU=zeros(1,N); %每座坝上游坝的数量
LU=zeros(N,50); %每座坝所有上游坝的编号
```

```

RANK=ones(1,N);      %每座坝的分级
for K=1:N
    if LD(K)>0
        NU(LD(K))=NU(LD(K))+1;
        LU(NU(LD(K), NU(LD(K)))=K;
    end
end
NAR=1;
while NAR>0
    C=1; NAR=0;
    for I=1:N
        T=0;
        for J=1:NU(I)
            if RANK(LU(I,J))>=C;
                T=T+1;
            end
        end
        if T>1
            RANK(I)=RANK(I)+1;
            NAR=NAR+1;
        end
    end
end
end

```

### 参考文献:

- [1] 刘晓燕, 高云飞, 王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 1 - 5, 10. (LIU Xiao-yan, GAO Yun-fei, WANG Fu-gui. Quantity and distribution of warping dams that still have sediment retaining ability in the Loess Plateau[J]. Yellow River, 2017, 39(4): 1 - 5, 10. (in Chinese))
- [2] 山西省水利厅. 山西省黄土高原地区淤地坝坝系工程项目后评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014. (Shanxi Provincial Water Conservancy Department. Post-evaluation of the construction project of silt dam system in the Loess Plateau of Shanxi Province[M]. Zhengzhou: The Yellowriver Water Conservancy Press, 2014. (in Chinese))
- [3] 高云飞, 郭玉涛, 刘晓燕, 等. 陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 73 - 79. (GAO Yun-fei, GUO Yu-tao, LIU Xiao-yan, et al. Failure criteria of the warping dams on sediment interception in the Middle Yellow River in northern Shaanxi[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 73 - 79. (in Chinese))
- [4] 李莉, 王峰, 孙维营, 等. 黄土高原淤地坝水毁问题分析[J]. 中国水土保持, 2014(10): 20 - 22. (LI Li, WANG Feng, SUN Wei-ying, et al. Analysis of water damage to warping dams on the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(10): 20 - 22. (in Chinese))
- [5] 李靖, 张金柱, 王晓. 20世纪70年代淤地坝水毁灾害原因分析[J]. 中国水利, 2003(17): 55 - 56, 32. (LI Jing, ZHANG Jin-zhu, WANG Xiao. Cause analysis of warping dam flood damage in 1970s[J]. China Water Resources, 2003(17): 55 - 56, 32. (in Chinese))
- [6] 陕西省水保局陕北淤地坝调查组. 1994年陕北地区淤地坝水毁情况调查[J]. 人民黄河, 1995(1): 15 - 18, 61. (Silt Arrester Investigation Team of Shaanxi Water and Soil Conservation Bureau. Investigation of silt arrester failures in North Shaanxi Province in 1994[J]. Yellow River, 1995(1): 15 - 18, 61. (in Chinese))
- [7] 王允升, 王英顺. 黄河中游地区1994年暴雨洪水淤地坝水毁情况和拦淤作用调查[J]. 中国水土保持, 1995(8): 23 - 26, 62. (WANG Yun-sheng, WANG Ying-shun. Situation of silt arresters destroyed by storm flood in 1994 and investigation on effect of retaining silt in middle Yellow River Region[J]. Soil and Water Conservation in China, 1995(8): 23 - 26, 62. (in Chinese))
- [8] 郑宝明, 王晓, 田永宏, 等. 黄河水土保持生态工程韭园沟示范区建设理论与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 138 - 145. (ZHENG Bao-ming, WANG Xiao, TIAN Yong-hong, et al. Theory and practice of Jiuyuangou demonstration area for soil and Water Conservation Ecological Engineering in the Yellow River[M]. Zhengzhou: The Yellowriver Water Conservancy Press, 2006: 138 - 145. (in Chinese))
- [9] 水利部水文局, 长江水利委员会水文局. 水文情报预报技术手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 378 - 383. (Hydrological Bureau of the Ministry of Water Resources, Hydrological Bureau of the Yangtze River Water Conservancy Commission. Technical manual of hydrological information and forecasting[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2010: 378 - 383. (in Chinese))
- [10] 水利部水利水电规划设计总院. 水工设计手册 第6卷 土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 505 - 517. (Water conservancy and hydropower planning and Design Institute, Ministry of water resources. Manual of Hydraulic Design, Vol6, Embankment Dams[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014: 505 - 517. (in Chinese))



- [11] 李占斌. 小流域淤地坝系防洪风险评价技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 141, 254. (LI Zhan-bin. Flood risk assessment technology of silt dam system in small watershed[M]. Beijing: China Science Press, 2018: 141, 254. (in Chinese))
- [12] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. *Revue Canadienne De Géotechnique*, 2000, **37**(5): 1000 - 1024.
- [13] XU Y, ZHANG L M. Breaching parameters for earth and rockfill dams[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(12): 1957 - 1970.
- [14] FROEHLICH D C. Peak outflow from breached embankment dam[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 1995, **121**(1): 90 - 97.
- [15] FROEHLICH D C. Embankment dam breach parameters revisited[C]// Proc 1st Int Conf on Water Resources Engineering, American Society of Civil Engineers. New York, 1995: 887 - 891.
- [16] DODSON. DAMBRK: A dam-break flood forecasting model[OL].[1998-06-20].<http://www.dodson-hydro.com/software/hydro-cd/programs/dambrk.htm>
- [17] 周兴波, 陈祖煜, 陈淑婧, 等. 基于 MIKE11 的堰塞坝溃决过程数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2014, **14**(6): 23 - 27. (ZHOU Xing-bo, CHEN Zu-yu, CHEN Shu-jing, et al. Simulation of the barrier dam breaching process based on MIKE 11[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, **14**(6): 23 - 27. (in Chinese))
- [18] CHEN Z, MA L, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **141**(4): 05014011.
- [19] WANG L, CHEN Z, WANG N X, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode[J]. *Engineering Geology*, 2016(209): 70 - 81.
- [20] 周建平, 王浩, 陈祖煜, 等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I: 理论基础和等级标准[J]. *水利学报*, 2015, **46**(5): 505 - 514. (ZHOU Jian-ping, WANG Hao, CHEN Zu-yu, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts part I: fundamentals and criteria[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(5): 505 - 514. (in Chinese))
- [21] 胡良明, 张志飞, 李仟, 等. 梯级水库土石坝连溃模拟及风险分析[J]. *水力发电学报*, 2018, **37**(7): 65 - 73. (HU LIANG-ming, ZHANG Zhi-fei, LI Qian, et al. Sequential dam break simulation and risk analysis of earth-rock dams of cascade reservoirs[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, **37**(7): 65 - 73. (in Chinese))
- [22] 陈祖煜. 溃坝洪水分析 DB-IWHR EXCEL 算法使用手册[OL]. [2017-09-21] <http://www.geoeng.iwhr.com/ytgcyjs/czy/zlxz/kbfx/webinfo/2017/09/1499910858046676.htm> (CHEN Zu-yu. Manual of DB-IWHR EXCEL algorithms for dam break flood analysis[OL]. [2017-09-21] <http://www.geoeng.iwhr.com/ytgcyjs/czy/zlxz/kbfx/webinfo/2017/09/1499910858046676.htm> (in Chinese))
- [23] WAN C F, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(4): 373 - 380.
- [24] BRIAUD J L. Case histories in soil and rock erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos river meander, Normandy cliffs, and New Orleans levees[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(10): 1425 - 1447.
- [25] BRIAUD J L, CHEN H C, GOVINDASAMY A V, et al. Erosion tests on samples from the New Orleans levees[J]. *American Society of Civil Engineers*, 2014(161): 1 - 16.
- [26] 赵人俊. 赵人俊水文预报文集[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 75 - 80. (ZHAO Ren-jun. ZHAO Ren-jun hydrological forecasting corpus[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1994: 75 - 80. (in Chinese))