

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.20180030

张成才, 武晶晶, 王普, 等. 一种小流域暴雨及洪水要素的快速计算方法及实现[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 203-208. ZHANG C C, WU J J, WANG P, et al. A fast calculation method for rainstorm and flood in small basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 203-208. (in Chinese)

一种小流域暴雨及洪水要素的快速计算方法及实现

张成才¹, 武晶晶¹, 王普¹, 张宇¹, 刘杰²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 河南省基础地理信息中心, 郑州 450001)

摘要: 暴雨是诱发山洪灾害的直接因素, 在流域的山洪灾害预警预报、风险评估时, 经常涉及长系列大量的暴雨和洪水要素的计算问题, 由于数据量巨大, 传统的根据实测降雨数据推算暴雨及洪水要素的方法效率低, 难以实现。以往常用的计算方法大多根据流域面积、净雨深和汇流时长等要素试算出结果, 虽然计算简单有效, 但是精度差。提出了一种小流域暴雨及洪水过程要素的快速计算方法, 将传统的方法和 C# 二次开发技术结合, 不仅保证了计算精度, 还大大提高了效率。实验对比结果表明, 新的暴雨洪水要素计算方法可以更加高效准确地计算出结果。

关键词: C# ; 降雨; 小流域洪水; 降雨要素; 洪水要素

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0203-06

A fast calculation method for rainstorm and flood in small basin

ZHANG Chengcai¹, WU Jingjing¹, WANG Pu¹, ZHANG Yu¹, LIU Jie²

(1. College of Environment & Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Basic Geographic Information Center, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Heavy rain is the direct cause of mountain torrents disasters. The early warning, forecast, and risk assessment of mountain torrents often involve the calculation of a series of heavy rain and flood elements. Because of the huge amount of data, the traditional method of calculating rainstorm and flood elements based on measured rainfall data is inefficient and difficult to implement. The commonly used calculation methods are mostly based on the basin area, net rainfall depth, and the length of confluence. They are simple and effective, but deliver poor accuracy. This paper puts forward a fast calculation method for rainstorm and flood in small basins, combining the traditional method and C# secondary development technology. This method guarantees calculation accuracy, and also greatly improves efficiency. The experimental results show that the new calculation method can generate the results more efficiently and accurately.

Key words: C# ; rainfall; flood in small basin; rainfall element; flood element

小流域暴雨洪水的预警预报是小流域防洪非工程措施的重要组成部分, 降雨及洪水要素计算是小流域暴雨洪水分析中重要的数据之一, 其计算的可靠性、准确性及效率对暴雨洪水分析及山洪灾害预警预报影响很大^[1-5]。本文挑选的降雨要素包括: 一

场降雨的起止时间和时段最大降雨量(1 h、2 h、3 h、6 h 和 12 h); 洪水要素包括: 一场洪水的起止时间、峰现时刻、洪量和洪峰流量。已有的计算一定历时最大降雨量的方法有水文气象法和频率计算法, 水文气象法属于半经验半理论的方法, 结果估算还存

收稿日期: 2017-06-14 修回日期: 2017-10-12 网络出版时间: 2017-12-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171228.1745.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739009); 河南省高等学校重点科研项目(16A420005)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51739009); Key Research Projects of Henan Colleges and Universities(16A420005)

作者简介: 张成才(1964-), 男, 河南郸城人, 教授, 博士, 主要从事遥感与地理信息系统方面的研究。E-mail: Zhangcc@zzu.edu.cn

通讯作者: 武晶晶(1994-), 女, 河南濮阳人, 主要从事水利信息技术研究。E-mail: 1139938414@qq.com

在一些问题;频率计算法针对不同地区,要选择不同的频率曲线,计算过程复杂,且结果误差较大^[69]。小流域暴雨洪水计算方法有 HEC-HMS 流域水文模型和推理公式法^[10-13],HEC-HMS 方法对地形资料的要求高,而且建模过程复杂;推理公式法涉及的参数多,获取困难,估算的参数存在较大误差,计算结果有很大的不确定性^[14-17]。基于以上工作,本文提出了一种暴雨洪水要素快速计算方法。首先将全部实测降雨数据导入到数组中,然后根据暴雨洪水划分标准,划分出暴雨和洪水场次,最后循环遍历每一场暴雨或洪水,推算出时段最大降雨量、峰现时刻、洪峰流量和洪量等要素。实验结果表明,相比于已有的计算方法,新的暴雨洪水要素计算方法,显著提高了处理数据的效率,大大增加了结果的准确度,为山洪灾害预警、预案编制等工作提供了技术支持^[18-19]。

1 降雨和洪水要素的计算方法及实现

1.1 降雨要素计算方法及实现

计算降雨要素,首先应该划分降雨场次,然后计算每场降雨里的时段最大降雨量。由于降雨场次划分条件是以每小时的降雨量为界限的,所以应首先计算暴雨资料内每小时的降雨量。

(1) 计算 1 h 降雨量。

考虑到暴雨资料中的起止时间间隔不一定是 1 h,因此计算 1 h 的降雨量要先把时间离散,然后相加得出 1 h 降雨量。本文将降雨时间离散成了 5 min 时间间隔,计算公式见式(1):

$$rainfall_5(t_1) = \begin{cases} \frac{rainfall}{(M_2 - M_1) \times 12} & M_1 \leq t_1 \leq M_2 \\ 0 & M_2 \leq t_1 \leq M_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $rainfall_5(t_1)$ 为 5 min 分钟降雨量(mm); t_1 为 5 分钟的时间范围; M_1 为降雨开始时间; M_2 为降雨结束时间, $rainfall$ 是对应时间的降雨量(mm); M_3 为下一次降雨的开始时间。

由式(1)得到每 5 min 的降雨量,1 h 的降雨量即为连续的 12 个 5 min 降雨量相加,见式(2):

$$rainfall_1(t_2) = \sum_{t_1=1}^{12} rainfall_5(t_1) \quad (2)$$

式中: $rainfall_1(t_2)$ 为 1 h 降雨量(mm), t_2 为 1 h 的时间范围。

主要的实现代码如下:

```
for (int i = 0; i < sh.LastRowNum - 1; i++)
{
    minutes1[i] = (dt[i, 1] - dt[i, 0]).Days * 24 * 12 + (dt[i,
    1] - dt[i, 0]).Hours * 12 + (dt[i, 1] - t[i, 0]).Minutes /
```

```
5; // 一次测量时间可以离散成几个 5 分钟
```

```
for (int j = k; j < k + minutes1[i]; j++)
```

```
{
```

```
    result[j] = rainFall[i] / minutes1[i]; // 一次测量时间
    内每 5 分钟的降雨量
```

```
}
```

```
k = k + minutes1[i];
```

```
}
```

(2) 划分暴雨场次。

本文假设每小时降雨量大于 4 mm 为暴雨开始时间,连续三小时降雨量小于 4 mm 为暴雨结束时间,划分出暴雨场次。主要的实现代码如下:

```
if (result[i] >= 4) // 每小时降雨量大于 4 mm
为暴雨开始时间
```

```
{
```

```
    b[d] = i;
```

```
    ...
```

```
    while (result[i] >= 4 || result[i+1] >= 4 || result[i+2]
    >= 4); // 连续三小时降雨量小于 4 mm 为暴雨结束时间
```

```
    c[d] = i - 1;
```

```
    ...
```

```
}
```

(3) 计算降雨要素。

在每一场暴雨里,逐一比较,找出 1 h 降雨量的最大值,即为 1 h 最大降雨量。由于 2 h 最大降雨量必须包括 1 h 最大降雨量,因此,1 h 最大降雨量分别相加其上下 1 h 的降雨量,较大的即为 2 h 最大降雨量。以此类推,可得出 3 h、6 h 及 12 h 最大降雨量。主要的实现代码如下:

```
if (max1[j] < result[l])
```

```
{
```

```
    max1[j] = result[l];
```

```
    index1 = l;
```

```
}
```

1.2 洪水要素计算方法及实现

计算洪水要素,首先应划分洪水场次,然后计算每场洪水的起止时刻和峰现时刻,最后计算洪峰流量和洪量。

(1) 划分洪水场次。

本文假设下一时刻的流量大于上一时刻,为洪水开始时刻,下一时刻的流量小于上一时刻,为峰现时刻(单峰型),下一次下一时刻流量大于上一时刻,为洪水结束时刻。但是需要注意的是如果相邻时间间隔大于 24 h,则将间隔的上一时刻视为洪水结束时刻。考虑到小流域洪水的特性,一般认为洪水历时不超过 72 h,且由于面积小,一般不考虑多峰和基流的情况。主要的实现代码如下:

```
if (flow[i+1] > flow[i])
```

```

{
    flow_be[ flow_sum ] = i;
    do
    {
        i+ + ;
    } while (flow[ i + 1 ] >= flow[ i]);
}
    
```

(2) 计算洪量。

本文使用面积法来计算洪量。将洪水过程线划分为若干小梯形,两个时刻的时间间隔为梯形的高,两个时刻分别对应的洪水流量为梯形的两底,计算每个小梯形的面积,梯形面积的累积和即为一场洪水的洪量。具体计算见式(3):

$$h = \sum (flow_1 + flow_2) \times (t_2 - t_1) / 2 \quad (3)$$

式中: t_1 为上一时刻; $flow_1$ 为上一时刻的流量(m^3/s); t_2 为下一时刻; $flow_2$ 为下一时刻的流量(m^3/s)。

主要的实现代码如下:

```

flux[ i ] + = (( flow[ j ] + flow[ j + 1 ] ) / 2 ) *
(( dth[ j + 1 ] - dth[ j ] ) . Hours * 60 + ( dth[ j + 1 ] -
dth[ j ] ) . Minutes);
    
```

(3) 计算洪峰流量。

本文只考虑洪水是单峰的情况,因此,峰现时刻对应的流量即为洪峰流量。

2 应用实例

本文以河南省告成流域为例,通过实测的暴雨数据,依据本文提出的新的计算方法,计算告成流域的暴雨和洪水要素。

2.1 研究区概况

告成流域位于河南省登封市告成镇,地处东经 113. 1° 和北纬 34. 4°,发源于河南省嵩山,经河南省周口市、安徽省阜阳市,在寿县正阳关(颍上县沫河口)注入淮河。该流域共有 46 个子流域,最小的子流域面积只有 0. 1 km^2 ,最大的子流域面积为 33 km^2 ,总面积为 622 km^2 。告成流域共有 5 个雨量站,分别为告成、石道、大金店、西白坪、登封雨量站,和 1 个告成水文站。研究流域雨量站及水文站分布见图 1。

2.2 实测暴雨数据

实测的暴雨数据包括雨量站数据和水文站数据,实测雨量站数据包括降雨开始时间、结束时间和降水量;实测水文站数据包括测量时间和流量。具体见表 1、表 2。



图 1 研究流域雨量站及水文站分布图

Fig. 1 Distribution of rainfall stations and hydrological stations in study basin

表 1 告成流域雨量站数据

Tab. 1 Rainfall station data of Gaocheng basin

站码	开始时间	结束时间	降水量 / mm
50620400	1980 04 10 17: 00: 00	1980 04 10 18: 00: 00	2. 50
50620400	1980 04 10 18: 00: 00	1980 04 10 19: 00: 00	4. 50
50620400	1980 04 10 19: 00: 00	1980 04 10 20: 00: 00	4. 70
50620400	1980 04 10 20: 00: 00	1980 04 10 21: 00: 00	4. 20
50620400	1980 04 10 21: 00: 00	1980 04 11 1: 00: 00	3. 80
50620400	1980 04 11 2: 00: 00	1980 04 11 4: 00: 00	0. 70
50620400	1980 04 11 18: 00: 00	1980 04 11 20: 00: 00	0. 20

表 2 告成流域水文站数据

Tab. 2 Hydrological station data of Gaocheng basin

站码	时间	水位/ m	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
50600100	1980 05 13 8: 00: 00	241. 15	0. 21
50600100	1980 05 13 20: 00: 00	241. 21	0. 45
50600100	1980 05 13 21: 00: 00	241. 39	1. 57
50600100	1980 05 13 21: 12: 00	241. 64	5. 36
50600100	1980 05 13 21: 18: 00	241. 90	22. 7
50600100	1980 05 13 21: 36: 00	242. 27	126
50600100	1980 05 13 22: 00: 00	242. 51	220

3 计算成果的输出与验证

3.1 计算成果的输出

本文提出的一种暴雨洪水要素快速计算方法,结果可以直接导出到 excel 表格里,告成流域降雨要素计算结果见表 3。

告成流域洪水要素的计算结果如表 4 所示。

3.2 计算成果的验证

以告成流域实测雨量站数据中 2013 年 5 月 26 日的降雨为例,起止时间和降水量见表 5。

本文假设 1 h 降雨量大于 4 mm 为降雨开始,连续三小时降雨量小于 4 mm 为降雨结束,划分降雨场次并计算降雨要素见图 2。

表 3 告成流域降雨要素计算结果

Tab. 3 Rainfall element calculation results of Gaocheng basin

降雨开始时间	降雨结束时间	1 h 最大降雨量/mm	2 h 最大降雨量/mm	3 h 最大降雨量/mm	6 h 最大降雨量/mm
1984-08-09 4:00:00	1984-08-09 12:00:00	19.40	31.10	35.40	53.50
1989-07-10 8:00:00	1989-07-10 14:00:00	8.50	16.20	22.70	39.10
1996-09-17 5:00:00	1996-09-17 15:00:00	13.40	26.70	33.40	49.20
2004-09-19 13:00:00	2004-09-19 19:00:00	10.10	18.00	21.30	33.70
2010-07-18 22:00:00	2010-07-19 5:00:00	35.90	66.80	84.10	149.70
2011-09-13 21:00:00	2011-09-14 3:00:00	6.10	7.90	10.50	24.70
2013-05-26 1:00:00	2013-05-26 9:00:00	9.70	17.80	24.80	38.50

表 4 告成流域洪水要素计算结果

Tab. 4 Flood element calculation results of Gaocheng basin

洪水开始时间	洪水结束时间	峰现时刻	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	洪量/万 m ³
1982-07-31 15:00:00	1982-08-01 10:00:00	1982-08-01 2:36:00	390.00	17.15
1982-08-01 10:00:00	1982-08-01 15:00:00	1982-08-01 11:00:00	137.00	3.43
1982-08-01 15:00:00	1982-08-01 23:00:00	1982-08-01 16:00:00	100.00	3.24
1982-08-01 23:00:00	1982-08-02 10:00:00	1982-08-02 4:00:00	149.00	5.68
1982-08-02 10:00:00	1982-08-02 15:00:00	1982-08-02 11:00:00	73.90	1.94
1982-08-02 15:00:00	1982-08-03 12:00:00	1982-08-02 18:30:00	151.00	8.71
1983-08-10 5:54:00	1983-08-10 11:00:00	1983-08-10 8:00:00	33.00	0.84
1983-08-10 11:00:00	1983-08-11 8:00:00	1983-08-10 14:00:00	52.00	2.96
1983-08-11 8:00:00	1983-08-12 2:00:00	1983-08-11 20:00:00	22.00	2.11

表 5 告成流域实测降雨数据

Tab. 5 Measured rainfall data of Gaocheng basin

起时间	止时间	降水量/mm
2013-05-26 0:00:00	2013-05-26 1:00:00	3.1
2013-05-26 1:00:00	2013-05-26 2:00:00	4.8
2013-05-26 2:00:00	2013-05-26 3:00:00	4.9
2013-05-26 3:00:00	2013-05-26 4:00:00	3.7
2013-05-26 4:00:00	2013-05-26 5:00:00	2.8
2013-05-26 5:00:00	2013-05-26 6:00:00	9.7
2013-05-26 6:00:00	2013-05-26 7:00:00	8.1
2013-05-26 7:00:00	2013-05-26 8:00:00	7.0
2013-05-26 8:00:00	2013-05-26 9:00:00	7.2
2013-05-26 9:00:00	2013-05-26 10:00:00	3.2
2013-05-26 10:00:00	2013-05-26 11:00:00	2.6
2013-05-26 22:00:00	2013-05-26 23:00:00	0.3

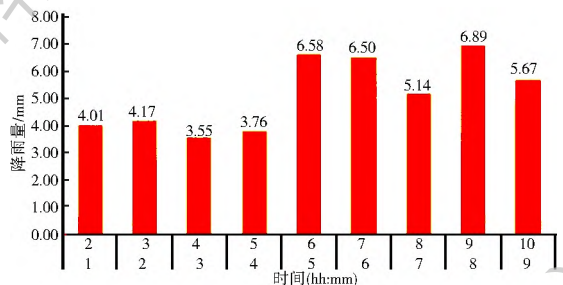


图 2 2013 年 5 月 26 日一场降雨过程柱状图

Fig. 2 Histogram of a rainfall on May 26, 2013

表 6 告成流域 2013 年 5 月 26 日降雨要素计算结果

Tab. 6 Calculation results of rainfall elements in Gaocheng basin on May 26, 2013

降雨开始时间	降雨结束时间	1h	2h	3h	6h
2013/5/26 1:00:00	2013/5/26 10:00:00	9.7	17.8	24.8	38.5

确,因此可以看出,该方法可以精确地计算降雨和洪水要素。

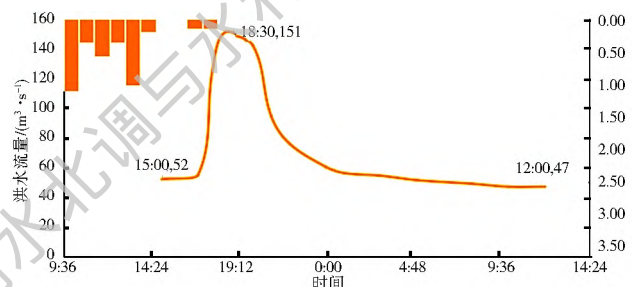


图 3 1982 年 8 月 2 日一场洪水过程线

Fig. 3 Hydrograph of a flood on August 2, 1982

根据图 2 计算得到 1 h、2 h、3 h 和 6 h 的最大降雨量,计算结果见表 6。

根据实测水文站数据,绘制 1982 年 8 月 2 日的一场洪水过程线,见图 3。

根据图 3 可计算得出洪水开始时间、洪水结束时间、峰现时刻、洪峰流量和洪量。计算结果见表 7。

对比表 3 和表 6、表 4 和表 7,可得出,本文提出的小流域降雨及洪水要素快速计算方法计算结果精

表7 洪水要素计算结果

Tab. 7 Calculation results of flood elements

洪水开始时间	洪水结束时间	峰现时刻	洪峰流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪量 (万 m^3)
1982-08-02 15:00:00	1982-08-03 12:00:00	1982-08-02 18:30:00	151.00	8.71

4 结语

本文提出了一种小流域暴雨及洪水要素的快速计算方法,首先计算每小时的降雨量,然后根据降雨场次划分条件,挑选出每一场降雨,其次循环计算对比,得出各个时段的最大降雨量,最后根据洪水场次划分条件,挑选出洪水,再运用数学积分的原理,计算出洪水总量。通过和人工计算结果对比发现,结果基本一致,准确性较高。

本文提出的方法借助 C# 语言编写程序进行实现,计算出结果只需要 1~2 s,并且直接将结果导出到 excel 表格中,大大提高了计算的效率和精度。但是该方法也具有一定的局限性,它只考虑的单峰洪水要素的计算,未考虑多峰和基流的情况,而且该方法在计算历时最大降雨量时,只能计算到 12 h 的最大降雨量,不过根据实际测量情况来看,几乎没有超过 12 h 的降雨,所以该方法仍具有一定的通用性。

参考文献(References):

- [1] 孙璟. 小流域山洪灾害预警预报研究—以堆子前流域为例[D]. 南昌:南昌工程学院, 2014. (SUN J. Study on mountain flood warning in small watershed in the Stack before the Basin[D]. Nanchang: Nanchang University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [2] 李磊. 推理公式法在土耳其小流域设计洪水计算中的适应性分析[J]. 水文, 2016, 36(2): 42-45. (LI L. Adaptability study on rational formula for Turkish small watershed design flood calculation[J]. Hydrology, 2016, 36(2): 42-45. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2016.02.008.
- [3] 张乐. 中小型流域无实测资料“雨洪法”暴雨计算实例分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(7): 81-83. (ZHANG L. The example analysis and computation of designstorm rain based on “rain flood” method in small medium river basin area without hydrologic data[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(7): 81-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2016.07.026.
- [4] J. Hood. C# 数据库入门经典[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 51-199. (J. Hood. C# Database Entry Classic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 51-199. (in Chinese))
- [5] ERIC Landquist. The Quadratic Sieve Factoring Algorithm. MATH488: Cryptographic Algorithms. December 14, 2001.
- [6] 林爱松. 小流域设计洪水计算方法的探讨[J]. 水利科技与经

济, 2012, 18(5): 12-34. (LIN A S. Study on the calculation method of design flood in small watershed[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(5): 12-34. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2012.05.026.

- [7] 邵尧明. 城市设计暴雨强度信息系统建立方法的探索[J]. 给水排水, 2007, 33(5): 65-90. (SHAO Y M. Exploration on establishment of GIS of urban storm intensity[J]. Water Supply and Drainage, 2007, 33(5): 65-90. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2007.05.054.
- [8] 张凌凯. 新疆头屯河流域饱和砂砾土动力参数试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 81-84. (ZHANG L K. Xinjiang Touthun River basin saturated gravel soil dynamic parameters test[J]. Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2016, 14(1): 81-84. (in Chinese))
- [9] 贾春玲. 季节冻土区边坡冻融稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 13(2): 189-192. (JIA C L. Analysis of freeze thaw stability of slope in seasonal frozen regions[J]. Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2016, 13(2): 189-192. (in Chinese))
- [10] 刘萍. 小流域设计洪水计算软件开发研究[D]. 太原:太原理工大学, 2008. (LIU P. Development of the Software for Calculating Design Flood in Small Basin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [11] 王明胜. 瞬时单位线法在水文资料缺乏地区洪峰流量推算中的应用[J]. 工程技术, 2010, (28)31, 33. (WANG M S. The instantaneous unit line method is applied in the calculation of the flow rate of flood peak in the absence of hydrologic data[J]. Engineering and Technology, 2010, (28)31, 33. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2010.28.008.
- [12] 赵睿. 山区小流域暴雨洪水分析计算方法应用研究[D]. 济南:山东大学, 2015. (ZHAO R. Study on the application of rainstorm flood analysis in small watershed in the mountainous area[D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese))
- [13] 徐德龙, 肖华. 小流域设计洪水推理公式计算方法探讨[J]. 人民长江, 2000(7): 13-14. (XU D L, XIAO H. Inquisition of computational methods for determining the design flood discharge in small basins[J]. Yangtze River, 2000(7): 13-14. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2000.07.005.
- [14] 唐纯喜. 中小流域设计洪水计算理论研究及其软件开发[D]. 杭州:浙江大学, 2003. (TANG C X. Study on design flood calculation and its software development in small and medium sized watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [15] 孙健, 赵平, 周秀骥. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 333-342. (SUN J, ZHAO P, ZHOU X J. The mesoscale structure of a South China rainstorm and the influence of complex topography[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(3): 333-342. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2002.03.009.
- [16] 陈银平. 基于 ArcGIS Engine 济南市雨情系统的设计与实现[D]. 济南:山东科技大学, 2010. (CHEN Y P. the design and implementation of the rain system in jinan city based on Arc

- GIS Engine [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 黄锋华. GIS 技术在小流域地区暴雨推求设计洪水的应用[J]. 广东水利水电, 2010, 10(10): 231-245. (HUANG F H. Application of GIS technology to designing flood based on rainstorm calculation in a small watershed [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010, 10(10): 231-245. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-0112.2010.10.012.
- [18] 汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 北京科学出版社, 2012. (TANG G A. ArcGIS geoinformation system space analysis test tutorial[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 郭建成. 小流域设计洪水计算应用程序—以江西省为例[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2014. (GUO C J. Design flood calculation application in small watershed—take jiangxi province as an example [D]. Nanchang: Nanchang University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [20] 郭邵平. 一种改进的落石冲击力计算方法[J]. 山地学报, 2014, 32(3): 345-349. (GUO S P. An improved impact force calculation method for rockfall [J]. Mountain Research, 2014, 32(3): 345-349. (in Chinese)) DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2014.03.010.
- [21] 张磊, 李诚. 无资料地区设计洪水的估算[J]. 湖南水利水电, 2008(2): 47-50. (ZHANG L, LI C. Design flood estimates in a non-data area [J]. Hunan Hydro & Power, 2008(2): 47-50. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-4229.2008.02.020.
- [22] SHERMAN L K. Streamflow from rainfall by unit graph method [J]. Engineering News Record, 1932, (108): 50F-50S.
- [23] CLARK C O. Storage and the unit hydrograph [J]. Proc. ASCE, 1945, 69: 1333-1360.
- [24] NASH J E. A unit hydrograph study, with particular reference to british catchments [J]. Proc. Inst. Civ. Eng., 1960, 17: 249-282.
- [25] Soil Conservation Service. National Engineering Handbook [M]. Section 4: Hydrology. USDA, Springfield, VA, 1993.

(上接第 74 页)

- [15] 王问宇, 袁鹏, 邵骏, 等. 改进粒子群算法在新安江模型参数优选中的应用[J]. 水力发电, 2008, 34(8): 14-16. (WANG W Y, YUAN P, SHAO J, et al. Application of improved particle swarm algorithm to the parameter selection optimization of Xin'anjiang Model [J]. Water Power, 2008, 34(8): 14-16. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2008.08.005.
- [16] REZAEE J A, JASNI J. Parameter selection in particle swarm optimization: A survey [J]. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2013, 25(4): 527-542. DOI: 10.1080/0952813X.2013.782348.
- [17] NOURMOHAMMADZADEH A, HARTMANN S, MA H. A Parallel Hybrid GA-PSO Approach with Dynamic Rule based Parameter Setting [C] // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2017: 215-216. DOI: 10.1145/3067695.3076051.
- [18] SHI Y, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization [C] // International Conference on Evolutionary Programming VII. Springer Verlag, 1998: 591-600. DOI: 10.1007/BFb0040810.
- [19] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [J]. Frontiers of Computer Science in China, 1999, 3(1): 31-37. DOI: 10.1109/CEC.1999.785511.
- [20] TRELEA I C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection [J]. Information Processing Letters, 2003, 85(6): 317-325. DOI: 10.1016/S0020-0190(02)00447-7.
- [21] 王维博, 林川, 郑永康. 粒子群算法中参数的实验与分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 76-79. (WANG W B, LIN C, ZHENG Y K. Experiment and analysis of parameters in particle swarm optimization [J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2008, 27(1): 76-79. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-159X.2008.01.026.
- [22] ZHANG W, MA D, WEI J, et al. A parameter selection strategy for particle swarm optimization based on particle positions [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(7): 3576-3584. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.10.061.
- [23] 刘苏宁, 甘泓, 魏国孝. 粒子群算法在新安江模型参数率定中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 537-544. (LIU S N, GAN H, WEI G X. Application of PSO algorithm to calibrate the xin'anjiang hydrological model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 537-544. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.05.003.
- [24] 李爱国, 覃征, 鲍复民, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(21): F3. (LI A G, QIN Z, BAO F M, et al. Particle swarm optimization algorithms [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(21): F3. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1002-8331.2002.21.001.
- [25] 刘志煌, 杨宜民. PSO 的惯性权重与种群大小选择[J]. 计算机与现代化, 2007, 2007(6): F3. (LIU Z H, YANG Y M. Inertia parameter and swarm size selection of PSO [J]. Computer and Modernization, 2007, 2007(6): F3. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2007.06.001.
- [26] RATHORE A, SHARMA H. Review on inertia weight strategies for particle swarm optimization [C] // Proceedings of Sixth International Conference on Soft Computing for Problem Solving. Springer, Singapore, 2017: 76-86. DOI: 10.1007/978-981-10-3322-3_8.
- [27] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [28] 陈仲堂. 应用数理统计[M]. 国防工业出版社, 2011. (CHEN Z T. Applied Mathematical Statistics [M]. National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese))