

# 山东省小流域短历时暴雨公式的优化及应用研究

白珊<sup>1</sup>, 赵莹<sup>2</sup>, 赵然杭<sup>1</sup>, 齐真<sup>1</sup>, 李冰<sup>2</sup>, 陈超<sup>1</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013)

**摘要:** 为了提高山洪灾害分析评价过程中设计暴雨计算的精度, 基于山东省多个雨量站长序列资料的暴雨-历时-频率变化特征, 利用小流域暴雨公式求导原理, 推导了设计暴雨多时段转换公式, 即设计暴雨计算优化公式。构建的优化公式准确地体现了小流域的暴雨变化规律和数值特征, 更具有合理性与实用性。以济南市历城区为例进行优化公式的应用研究。结果表明, 计算精度较现行公式平均提高 17.99 个百分点, 为提高设计洪水计算以及预警指标分析确定的精度奠定了基础。

**关键词:** 设计暴雨; 短历时暴雨; 暴雨公式优化; 时段转换公式; 小流域; 山东省

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0050-05

## Study on formula optimization and application of short duration rainstorm for small river basin in Shandong

BAI Shan<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>2</sup>, ZHAO Ranhang<sup>1</sup>, QI Zhen<sup>1</sup>, LI Bing<sup>2</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China )

**Abstract:** To improve the calculation accuracy of design rainstorm in the process of evaluation of mountain flood disaster, the paper analyzed the variation characteristics of rainstorm-time-frequency with the long sequence data from lots of rainfall stations in Shandong province, deviated the law according to the principle of rainstorm formula in small river basin and put forward the multi-period conversation formula which is the optimization formula for the calculation of design rainstorm. The optimization formula accurately reflects the change rule of small watershed rainstorm and numerical characteristics and has more rationality and practicability. Taking the Licheng district of Jinan for example, the paper conducted the Study on the application of optimization formula. The result shows that the accuracy of optimization formula has improved 17.99% by an average compared to the current formula, which can provide the basis for the accuracy of design storm calculation and the analysis of early warning index.

**Key words:** design storm; short duration rainstorm; formula optimization of rainstorm; period conversion formula; small river basin; Shandong Province

水污染、水资源短缺、洪涝灾害是当前的三大水问题, 而暴雨是形成洪涝灾害的主要成因, 研究暴雨的变化规律和数值特征对于防洪减灾有着重要意义, 为水利建设、交通运输等诸多方面的规划设计提供基础依据<sup>[1]</sup>。

近年来山洪灾害频发, 亟待建设相应的预警设施平台, 这对设计暴雨、设计洪水、预警指标的分析

计算提出了更高的要求, 而设计暴雨值计算是预警平台建设的基础, 研究短历时设计暴雨计算意义重大<sup>[2]</sup>。降水历时小于 24 h 的暴雨称为短历时暴雨。在计算各个历时的设计暴雨量时, 通常做法是先求得 24 h 设计暴雨, 再根据暴雨公式推算其他短历时设计暴雨量。暴雨公式的指数  $n_2$  对计算成果影响甚大, 当  $n_2$  相差 0.05 时, 推算出的 1 h 雨量可相差

收稿日期: 2016-03-07; 修回日期: 2016-05-04

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目 (2015BAB07B00); 山东省山洪灾害防治技术应用研究项目 (SZJSYY-YJ201501; SZJSYY-YJ201502); 水利部“948”项目 (201319)

作者简介: 白珊 (1991-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文学与水资源管理。

通讯作者: 赵然杭 (1969-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水资源利用与管理、湿地水文与生态环境管理及工程模糊集理论与应用。

17%,推算的 3 h 雨量误差达 11%,6 h 误差达 7%;当  $n_2$  相差 0.1 时,推算的 3 h 雨量误差达 23%,6 h 误差达 15%;当  $n_2$  相差 0.15 时,推算的 3 h 误差达 37%,6 h 误差达 23%,12 h 误差达 11%<sup>[3]</sup>。

由于  $n_2$  值对设计暴雨计算结果的精度影响甚大,参数取值的误差将直接影响到设计洪水计算及预警指标分析计算的精度<sup>[4-5]</sup>。《山东省水文图集》中暴雨衰减系数  $n_2$  是根据 1975 年以前不到 10 年的 9 个站的水文资料整理所得,由于当时计算技术落后,且工作量大,所以由人工计算得到了地区综合值<sup>[6]</sup>。多年来为山东省水利水电工程建设的规划设计、山洪灾害分析评价、预警指标计算以及其他国民经济建设发挥了重要作用。随着科技发展水平和计算机水平的提高以及暴雨资料的累积,可对暴雨参数进行修订,且随着时间推移,小流域下垫面条件发生变化,图集中的参数在计算设计暴雨时易产生误差。所以本文对 1~24 h 的设计暴雨公式进行优化,并对设计暴雨参数取值方法进行研究,进而提高设计洪水计算与预警指标分析计算的精度<sup>[7]</sup>。

1 暴雨公式优化方法

1.1 现行暴雨公式

短历时设计暴雨计算一般做法是根据暴雨的强度-历时关系将年最大 24 h 设计暴雨转化成其他时段的设计暴雨,目前水利部门多用式(1)进行计算<sup>[3]</sup>,即:

$$H_{t,p} = S_p t^{1-n} \tag{1}$$

式中:  $H_{t,p}$  为历时为  $t$ 、频率为  $p$  的暴雨量,mm;  $S_p$  为  $t = 1h$  的平均雨强,也称为雨力,mm/h。

在双对数纸上,点绘平均暴雨强度随时间  $t$  的变化曲线,该曲线为直线,一般在  $t = 1 h$  处出现转折,如图 1 所示。当  $0 < t < 1 h$ ,取  $n = n_1$ ; 当  $t \geq 1 h$ ,则  $n = n_2$ 。

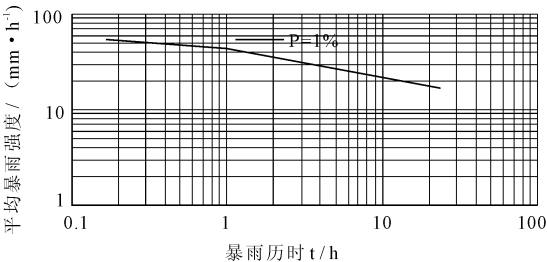


图 1 暴雨强度-历时-频率曲线示意图

各个地区根据小流域的实测资料进行地区综合,画出  $n$  值分区图,形成水文图集供无资料地区计算使用。

1.2 暴雨公式优化

1.2.1 设计暴雨多时段转换公式推导 根据多个雨量站的长序列实测降雨资料(平均 54 a),绘制暴雨强度-历时-频率的关系曲线,如图 2 所示。

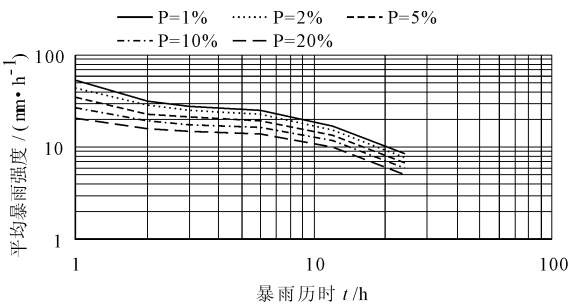


图 2 暴雨强度-历时-频率曲线示意图

从图 2 与图 1 可以看出,两图中暴雨强度-历时-频率曲线的变化特征不一致,图 1 中在  $t = 1 h$  处出现明显转折点,而图 2 中在  $t = 1、2、3、6、12 h$  等历时处均存在转折变化。这一特征表明,1~24 h 的设计暴雨计算存在多个暴雨衰减系数。所以作者根据图 2 所示的变化特征,以 1、2、3、6、12、24 h 为节点,将 1~24 h 分成 12~24、6~12、3~6、2~3、1~2 h 等 5 个时段,以式(1)为基础,分别推导设计暴雨计算公式,计算不同时段的暴雨衰减系数,进而构建设计暴雨多时段转换公式。

具体推导过程如下:

(1) 12~24 h 时段

由式(1)推导原理推导出:

$$H_{24,p} = a_{12,p} \cdot 13^{1-n_6} \tag{2}$$

$$a_{12,p} = \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6}} \tag{3}$$

式中:  $a_{12,p}$  为历时为 12 h、频率为  $p$  的平均暴雨强度; $n_6$  为 12~24 h 间的衰减系数值,由式(2)与式(3)迭代计算。

根据式(2)与式(3)推导出 12~24 h 时段的设计暴雨计算公式(4):

$$H_{t,p} = \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6}} \cdot (t - 11)^{1-n_6} \tag{4}$$

(12 ≤ t ≤ 24 h)

(2) 时段 6~12 h 设计暴雨计算公式

根据式(4)计算得到  $t = 12 h$  的设计暴雨量,再根据 6h 的平均暴雨强度推导 6~12 h 时段的设计暴雨计算公式,推导公式如下:

$$H_{12,p} = a_{6,p} \cdot 7^{1-n_5} \tag{5}$$

$$a_{6,p} = \frac{H_{12,p}}{7^{1-n_5}} \tag{6}$$

式中： $a_{6,p}$  为历时为 6 h、频率为  $p$  的平均暴雨强度； $n_5$  为 6 ~ 12 h 间的衰减系数值。

根据式(5) 与式(6) 推导出 6 ~ 12 h 时段的设计暴雨计算公式(7)、(8)：

$$H_{t,p} = \frac{H_{12,p}}{7^{1-n_5}} \cdot (t - 5)^{1-n_5}$$

(7)

$$\text{即:} H_{t,p} = \frac{H_{12,p}}{13^{1-n_6} \cdot 7^{1-n_5}} \cdot (t - 5)^{1-n_5}$$

(8)

(6 ≤ t ≤ 12 h)

(3) 其他时段转换公式

与 12 ~ 24 h 和 6 ~ 12 h 时段相似,推导出其他时段的设计暴雨计算公式。

(4) 设计暴雨计算优化公式

由不同时段的设计暴雨计算公式,建立小流域设计暴雨多时段转换公式(9)：

$$H_{t,p} = \begin{cases} \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6}} \cdot (t - 11)^{1-n_6} & (12 \leq t \leq 24 \text{ h}) \\ \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6} \cdot 7^{1-n_5}} \cdot (t - 5)^{1-n_5} & (6 \leq t \leq 12 \text{ h}) \\ \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6} \cdot 7^{1-n_5} \cdot 4^{1-n_4}} \cdot (t - 2)^{1-n_4} & (3 \leq t \leq 6 \text{ h}) \\ \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6} \cdot 7^{1-n_5} \cdot 4^{1-n_4} \cdot 2^{1-n_3}} \cdot (t - 1)^{1-n_3} & (2 \leq t \leq 3 \text{ h}) \\ \frac{H_{24,p}}{13^{1-n_6} \cdot 7^{1-n_5} \cdot 4^{1-n_4} \cdot 2^{1-n_3} \cdot 2^{1-n_2}} \cdot t^{1-n_2} & (3 \leq t \leq 6 \text{ h}) \end{cases}$$

(9)

式(9)就是优化的设计暴雨公式。各地区可根据当地实际暴雨-历时变化过程,推导相应的时段转换公式,推导原理与上述相似。

1.2.2 参数确定方法 参数的确定是计算设计暴雨量的关键,应结合当地的雨量站实测资料分析综合计算能代表当地流域暴雨特性的  $n$  值。首先根据当地各个雨量站的实测资料点绘暴雨-历时-频率折线图,通过图线所示规律确定如何分段,结合式(1)及式(9)推导出转换公式。一般暴雨-历时变

化不随频率不同而变,将各个历时的实测暴雨量带入推导的转换公式即可计算出各个时段间的暴雨衰减系数。由于各地的水文站点稀疏程度不一,需根据各个地方的雨量站点位置分析确定参数值,必要时可画出暴雨参数等值线图供无资料地区使用<sup>[8-9]</sup>。

1.3 应用条件

小流域设计暴雨计算是以流域中心点的设计雨量代替整个流域的面雨量,但现有的站网密度条件各异,资料系列也长短不一,大部分小流域缺乏雨洪资料,即缺乏流域中心的长历时暴雨资料。式(9)可在计算山东省中小流域设计暴雨值时采用,但应结合计算目标在流域中的位置、河流走向、雨量站位置和降雨资料综合确定。

2 应用研究

2.1 研究区域

济南历城区地处鲁中南低山丘陵与鲁西平原交接地带,地势南高北低,海拔高度 20 ~ 975 m,根据暴雨径流分区不同属泰沂山区。自南向北地貌类型主要为山地、丘陵、平原 3 种,南部山地丘陵带面积 1135 km<sup>2</sup>,占历城区总面积的 67%;中部山前平原带面积 278 km<sup>2</sup>,占 16.4%;北部临黄平原带面积 281 平方公里,占 16.6%。受地形、地貌及降雨等多种条件的复杂影响,历城区易发生山洪灾害。据统计自解放以来历城区共发生典型山洪灾害 5 次,对人民的社会经济财产造成了巨大损失<sup>[10]</sup>。

2.2 历城区设计暴雨公式构建及参数确定

历城区 10 ~ 50 km<sup>2</sup> 的小流域数量达到 90 个,为了研究当地的暴雨-历时-频率变化特征,对当地 11 个雨量站(站点信息见表 1,站点位置见图 3)的降雨资料进行分析,结果表明各站的 1 ~ 24 h 的变化特征与图 2 所示特征相似,为了验证多个时段计算结果的合理性,根据收集的资料以四个典型时段(1、3、6、24 h)为节点根据式(9)推导设计暴雨公式<sup>[11]</sup>,且结合各雨量站实测资料计算不同时段的暴雨衰减系数值,并采用最小二乘法分析计算了不同频率之间的  $n$  值变化<sup>[12]</sup>,计算出了综合值,历城区各个站点不同时段的衰减系数值见表 2。

表 1 历城区雨量站点实测资料累计数信息表

a

|      |     |    |    |     |    |     |       |    |    |     |
|------|-----|----|----|-----|----|-----|-------|----|----|-----|
| 大陈家庄 | 黄台桥 | 韩仓 | 东梧 | 王家庄 | 西营 | 邱家庄 | 卧虎山水库 | 柳埠 | 窝铺 | 南高而 |
| 51   | 65  | 49 | 50 | 51  | 63 | 57  | 59    | 51 | 52 | 52  |

表 2 济南市历城区暴雨衰减系数取值表

| 时段区间              | 雨量站  |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
|                   | 大陈家庄 | 黄台桥  | 韩仓   | 东梧   | 王家庄  | 西营   | 邱家庄  | 卧虎山水库 | 柳埠   | 窝铺   | 南高而  |
| 1 ~ 3 h( $n_2$ )  | 0.40 | 0.54 | 0.32 | 0.41 | 0.44 | 0.45 | 0.55 | 0.55  | 0.54 | 0.47 | 0.37 |
| 3 ~ 6 h( $n_3$ )  | 0.56 | 0.83 | 0.56 | 0.67 | 0.85 | 0.86 | 0.89 | 0.79  | 0.87 | 0.84 | 0.86 |
| 6 ~ 24 h( $n_4$ ) | 0.88 | 0.91 | 0.90 | 0.86 | 0.86 | 0.90 | 0.92 | 0.93  | 0.94 | 0.92 | 0.92 |



图 3 历城区雨量站点位置图

表 2 根据收集到的历城区的雨量站点资料列出了 3 个时段的暴雨衰减系数取值,即不同的时段采用不同的衰减系数,在设计暴雨计算时需根据小流域所在的位置,结合地形以及河道走势情况,选择合适的雨量站点进行计算。

2.3 设计暴雨计算

分别在历城区南部山地丘陵带、中部山前平原带和北部临黄平原带选取崔家庄小流域、巨野河上游小流域和鲍山小流域作为典型小流域。3 个小流域分别有一个雨量站:卧虎山水库站、王家庄站、韩仓站。利用优化公式和现行公式分别以 24 h 暴雨量计算其他时段暴雨量,并与实测资料 P - III 型曲线适线结果进行比较<sup>[13]</sup>,验证优化公式的准确性。3 个雨量站 24 h 实测暴雨量见表 3。

(1)典型小流域选择及其概况。崔家庄小流域位于济南西南部山区,流域上游汇流面积较大,为 300 多 km<sup>2</sup>,汇流时间较长,且经初步验算为 12 h 以上,于是以 24 h 暴雨量计算 12h 暴雨量进行验证。

巨野河上游小流域位于济南中部山前平原带,为巨野河起源地地带,流域上游汇流面积适中,约

40 km<sup>2</sup>,汇流时间经初步验算为 4 ~ 5 h,于是以 24 h 暴雨量计算 5 h 暴雨量进行验证。

鲍山小流域位于济南泛黄平原带与山前平原带交汇处,流域上游汇流面积较小,为 20 多 km<sup>2</sup>,汇流时间经初步验算为 2 h 左右,于是以 24 h 暴雨量计算 2 h 暴雨量进行验证。

表 3 3 个雨量站 24 h 实测暴雨量 mm

| 雨量站   | 频率/%    |         |         |          |          |
|-------|---------|---------|---------|----------|----------|
|       | $P = 1$ | $P = 2$ | $P = 5$ | $P = 10$ | $P = 20$ |
| 卧虎山水库 | 245.06  | 219.11  | 184.16  | 156.99   | 128.80   |
| 王家庄站  | 215.80  | 193.79  | 164.04  | 140.82   | 116.58   |
| 韩仓站   | 275.80  | 239.25  | 191.05  | 154.72   | 118.58   |

(2)设计暴雨量计算。根据 3 个小流域特点,利用 24 h 暴雨量,分别采用优化公式和现行公式计算其他时段的暴雨量,并与雨量站多年实测降雨资料 P - III 型曲线适线结果进行误差对比。结果见表 4 ~ 6。

2.4 结果分析

从表 4 ~ 6 中可以看出:

优化公式计算的 3 个小流域五种频率的设计暴雨值与实测资料相比误差较小。计算的崔家庄小流域误差最大为 3.6%,平均误差为 2.12%;计算的巨野河上游小流域误差最大为 9.87%,平均误差为 4.85%;计算的鲍山小流域误差最大为 7.8%,平均误差为 5.08%。由此表明,优化公式计算的设计暴雨精度较高。

表 4 崔家庄小流域 12h 暴雨量计算结果对比表

| 暴雨量方法   | 频率/%    |         |         |          |          |
|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
|         | $P = 1$ | $P = 2$ | $P = 5$ | $P = 10$ | $P = 20$ |
| 实测资料/mm | 237     | 210     | 173     | 145      | 116      |
| 优化公式/mm | 229     | 204     | 172     | 146      | 120      |
| 相对误差/%  | (3.59)  | (2.57)  | (0.85)  | (0.87)   | (3.18)   |
| 现行公式/mm | 208     | 186     | 156     | 133      | 109      |
| 相对误差/%  | (12.45) | (11.53) | (9.97)  | (8.41)   | (6.31)   |

| 表 5 巨野河上游小流域 5h 暴雨量计算结果对比表 |         |         |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 暴雨量方法                      | 频率/%    |         |         |         |         |
|                            | P = 1   | P = 2   | P = 5   | P = 10  | P = 20  |
| 实测资料/mm                    | 128     | 115     | 98      | 84      | 70      |
| 优化公式/mm                    | 129     | 118     | 102     | 90      | 78      |
| 相对误差/%                     | (0.6)   | (2.17)  | (4.65)  | (6.98)  | (9.87)  |
| 现行公式/mm                    | 148     | 133     | 113     | 97      | 80      |
| 相对误差/%                     | (13.71) | (13.52) | (13.20) | (12.91) | (12.51) |

| 表 6 鲍山小流域 2h 暴雨量计算结果对比表 |         |         |         |         |         |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 暴雨量方法                   | 频率/%    |         |         |         |         |
|                         | P = 1   | P = 2   | P = 5   | P = 10  | P = 20  |
| 实测资料/mm                 | 94      | 79      | 60      | 46      | 33      |
| 优化公式/mm                 | 86      | 74      | 59      | 47      | 36      |
| 相对误差/%                  | (7.8)   | (5.79)  | (2.12)  | (1.91)  | (7.76)  |
| 现行公式/mm                 | 151     | 132     | 105     | 85      | 65      |
| 相对误差/%                  | (38.35) | (40.01) | (42.82) | (45.64) | (49.29) |

与现行公式相比,优化公式较大提高了设计暴雨计算精度。现行公式计算的设计暴雨结果误差较大,最大为 49.29%,平均误差为 22.04%;优化公式计算的设计暴雨误差最大为 9.87%,平均误差为 4.05%,与现行公式相比,精度平均提高 17.99%。更具有准确性,为小流域设计洪水计算以及预警指标分析提供了精确依据。

3 结 论

设计暴雨的计算是设计洪水计算以及预警指标分析确定的基础,意义重大,本文在现行暴雨公式的基础上进行了优化,推导出设计暴雨多时段转换公式,并结合济南市历城区地形位置条件,选取了典型小流域进行应用研究。结论如下:

- (1)基于多年实测雨量资料构建的优化公式准确的体现了小流域的暴雨强度-历时-频率变化特征,更符合目前的实际情况,具有合理性和实用性。
- (2)优化公式在济南市历城区的实际应用表

明:计算精度较现行公式精度,平均提高 17.99%,准确性较高,为历城区设计洪水以及预警指标分析计算的精度提供了保障。

(3)为了证明优化公式的合理性和适用性,经在南四湖湖东区典型区域的初步计算,计算精度提高约 9.7%(由于篇幅限制,此处不再赘述),后续尚需进一步收集更多地区雨量站的多年长序列降雨资料,验证优化公式的准确性。

参考文献:

[1] 陈莹,尹义星,陈兴伟. 19 世纪末以来中国洪涝灾害变化及影响因素研究[J]. 自然资源学报,2011,26(12): 2110-2120.

[2] 涂勇,何秉顺,褚明华,等. 2013 年全国山洪灾害特征分析[J]. 中国水利,2014(18):18-22.

[3] 梁忠民,钟平安,华家鹏. 水文水利计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:102-105.

[4] 赵睿. 山丘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.

[5] 任春风. 山东省小流域山洪灾害预警指标分析研究与应用[D]. 济南:山东大学,2015.

[6] 山东省革命委员会水利局. 山东省水文图集[M]. 济南:山东省革命委员会水利局,1975:9-10.

[7] 陈干琴,刘炳忠,宋秀英,等. 山东省点暴雨统计参数空间分布及影响因素分析[J]. 水文,2011,31(1):92-96.

[8] 王宁. 天津市区暴雨分布规律分析与设计暴雨问题的研究及应用[D]. 天津:天津大学,2007.

[9] 霍勇峰. 山西省设计暴雨雨型分析[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):158-161.

[10] 初勇吉. 济南市历城区防洪体系现状分析与对策[D]. 济南:山东大学,2013.

[11] 武晟. 西安市降雨特性分析和城市下垫面产汇流特性实验研究[D]. 西安:西安理工大学,2004.

[12] 陈奕. 福州市暴雨强度公式优化研究[J]. 给水排水,2013,24(10):36-40.

[13] 王俊萍. 推求绵阳市暴雨强度公式的问题研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.