

山洪灾害雨量预警指标影响因素敏感性分析

王 丹¹, 马细霞¹, 刘昌军²

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘 要:选取山洪灾害雨量预警指标计算过程中涉及的前期影响雨量、糙率、水面比降、汇流参数、降雨损失参数等 5 个主要参数, 分别采用趋势法和灰色关联法分析各参数的敏感性。以河南省栾川县北沟河小流域为实例进行应用分析, 结果表明影响雨量预警指标的各参数敏感性大小依次为糙率、水面比降、前期影响雨量、降雨损失参数、汇流参数。提出在山洪灾害雨量预警指标计算中, 应重点分析糙率的取值, 对提高山洪灾害预警指标精准度有重要意义。

关键词:山洪灾害; 雨量预警指标; 敏感性分析

中图分类号: TV877

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2018)04-0035-05

山洪灾害是由地形地貌、地层岩性、大气降雨等多种因素综合作用的结果, 其中降雨是最活跃、最主要的因素, 降雨量或雨强的控制性指标(临界雨量或临界雨强)是山洪灾害气象预报预警与制定综合防治规划方案的关键依据^[1]。雨量预警指标通过分析不同预警时段的临界雨量得出, 其计算过程中涉及参数众多, 主要有前期影响雨量、糙率、汇流参数等。雨量预警指标影响因素敏感性分析就是定量分析各参数与预警指标之间的相关性, 即分析各参数的变化对预警指标的影响。通过敏感性分析, 可以找出影响雨量预警指标计算结果的主要参数, 对进一步提高预警指标精准度, 避免或最大程度降低山洪造成的损失具有重要的意义^[2]。资料基础及技术条件是选择预警指标确定方法的前提和基础^[3], 对于资料缺乏地区, 水位流量反推法以洪水与暴雨同频率为基础, 结合历次灾害水位及防洪工程情况计算分析临界雨量, 在实际应用中有一定的参考价值^[4]。目前对预警指标计算过程中涉及的参数敏感度的研究成果较少, 部分参数经验性强, 具有较大的随意性和主观性, 准确度亟待提高。灰关联分析反映了离散序列空间的收敛和接近的程度, 具有代数与几何双重特点, 其对样本容量要求不高, 同时可以对同一个样本进行多个参考序列的分析, 与单纯的回归分析相比,

更具有整体性和层次性^[5]。本文以河南省栾川县北沟河小流域为研究实例, 考虑影响雨量预警指标的 5 个主要参数, 即水面比降、糙率、汇流参数、前期影响雨量、降雨损失参数, 在影响程度趋势分析的基础上, 采用灰色关联度系统评价 5 个参数对预警指标的敏感性影响大小^[6]。

1 研究方法

1.1 雨量预警指标计算

水位流量反推法是计算临界雨量的主要方法之一, 其思路为: 首先确定防灾对象的成灾水位, 然后根据断面特征、水位~流量关系确定成灾流量, 并确定其对应的频率 P_m , 最后计算频率为 P_m 的各时段降雨量, 即为各时段的临界雨量。考虑防灾对象所处河段河谷形态、洪水上涨速率、预警响应时间和站点位置等因素, 在临界雨量的基础上综合确定准备转移和立即转移的预警指标^[3]。

1.1.1 设计暴雨洪水计算

设计面雨量计算公式为:

$$H_{tp} = \alpha \times \overline{H}_t \times K_p \quad (1)$$

式中: H_{tp} 为 t 时段设计面雨量; \overline{H}_t 为 t 时段点雨量均

收稿日期: 2017-09-27

作者简介: 王丹(1991-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: 455743139@qq.com

通讯作者: 马细霞(1963-), 女, 河南叶县人, 教授, 研究生导师, 主要从事水文学及水资源方面的教学与科研工作。E-mail: maxx@zzu.edu.cn

值; K_p 为模比系数,由雨量变差系数 C_v 查皮尔逊型曲线 K_p 值表求得; α 为点面关系系数。其中, \overline{H}_l 和 C_v 从《河南省暴雨参数图集》读取^[7], α 根据流域所在水文分区,查短历时暴雨时面深($t-F-\alpha$)关系图求得。

采用推理公式法计算设计洪峰流量:

$$Q_{mp}=0.278\frac{\psi S}{\tau}F \quad (2)$$

$$\psi=1-\frac{\mu}{S}\tau^n \quad (3)$$

$$\tau=0.278\frac{L}{mJ^{1/3}Q_{mp}^{1/4}} \quad (4)$$

式中: Q_{mp} 为设计洪峰流量, m^3/s ; ψ 为洪峰径流系数; τ 为流域汇流时间,h; F 为流域面积, km^2 ; L 为流域最长汇流路径,km; J 为沿流程的平均纵比降,‰; m 为汇流参数; n 为暴雨递减指数; μ 为降雨损失参数,mm/h; S 为雨力,mm/h。

将流域特征参数 F 、 L 、 J ,暴雨参数 S 、 n ,降雨损失参数 μ 和汇流参数 m 代入式(1)、(2)、(3)、(4),用试算法计算不同频率 P 对应的洪峰流量,绘制 $P\sim Q_m$ 曲线。

1.1.2 水位流量关系及成灾流量确定

根据河道断面资料,计算控制断面水力参数,采用曼宁公式得到控制断面水位流量关系^[8]:

$$Q=A\times\frac{1}{n}\times R^{\frac{2}{3}}\times J^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为断面过水面积, m^2 ; n 为糙率; R 为水力半径,m; J 为洪水水面线比降。由现场调查得到的成灾水位,查水位流量关系推求成灾流量。

1.1.3 临界雨量计算

由成灾流量查 $P\sim Q_m$ 曲线,得到成灾频率。在降雨与洪水同频率的假定下,利用成灾频率计算出该频率下不同时段降雨量,即为所求的临界雨量^[9]。

1.2 灰色关联分析

1.2.1 基本原理

灰色关联分析通过探寻系统中各因素之间的关联性(以关联度表示),找出影响目标值的重要因素^[10]。其基本思想是:以因素的数据序列为依据,用数学的方法研究因素间几何对应关系^[11],序列曲线的几何形状越接近,则它们之间的灰关联度越大,反之越小^[12]。

1.2.2 分析方法

指定参考数列矩阵 X 和被比较数列矩阵 Y :

$$X=\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y=\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} y_1(1) & y_1(2) & \cdots & y_1(n) \\ y_2(1) & y_2(2) & \cdots & y_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m(1) & y_m(2) & \cdots & y_m(n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于原始数据量纲及数量级不同,因此需要进行无量纲化处理,本文采用区间相对值化法处理。对处理后的数列矩阵 X' 、 Y' 作如下变换,形成新的差异序列矩阵:

$$\Delta_i(k)=|x'_i(k)-y'_i(k)| \quad (8)$$

在差异序列矩阵中找出最大值 Δ_{\max} 和最小值 Δ_{\min} ,则关联系数矩阵:

$$G=\frac{\Delta_{\min}+\xi\Delta_{\max}}{\Delta_i(k)+\xi\Delta_{\max}} \quad (9)$$

式中: $\xi\in(0,1)$ 为分辨系数,一般按最少信息原理取为0.5。

关联度是作为衡量指标序列相似程度的测度,为 $[0,1]$ 区间内变化的量,且关联度越接近1,该子序列对母序列的影响越敏感;反之,关联度越接近0,其影响越不敏感。关联度的计算可由下式得到:

$$r_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n g_i(k) \quad (10)$$

对关联度进行大小排序,即为影响因素敏感性大小的排序^[13]。

2 实例分析

2.1 研究流域概况

河南省栾川县北沟河位于伊河流域,控制流域面积 $118.94 km^2$,属土石山区,地势陡峭、土层浅薄,河床坡度平均在 $11.3\text{‰}\sim 13.2\text{‰}$,洪水汇流时间短,洪峰流量大,易造成山洪灾害。选取北沟河沿岸郭店村柏树庄组为防灾对象,控制断面以上流域面积 $44.57 km^2$,河道长度 $12.467 km$,河道比降 0.028 ,居民户 29 户,人口数 138 人,成灾水位 $910.51 m$,北沟河小流域DEM高程图如图1所示。

2.2 参数选取

雨量预警指标计算过程涉及的参数众多,其中水位流量关系转换中,糙率 n 和水面比降 J 是两个重要

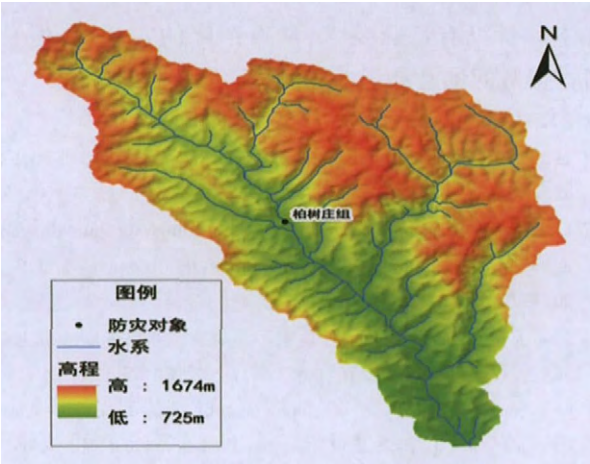


图1 北沟河小流域 DEM 高程图
Fig.1 DEM of the Beigou River watershed

的参数,对关系曲线影响显著;前期影响雨量 P_a 和降雨损失参数 μ 对流域产流多少有直接影响;汇流参数 m 直接影响汇流时间和洪峰流量大小。因此选取糙率 n 、水面比降 J 、汇流参数 m 、降雨损失参数 μ 、前期影响雨量 P_a 5个主要参数进行敏感性分析。

2.3 不同参数值下临界雨量计算结果

假定某一参数变化,其他参数不变,采用水位流量反推法推求预警时段为1h和2h的临界雨量。分别选取6组不同的糙率 n 、水面比降 J 、汇流参数 m 、降雨损失参数 μ 、前期影响雨量 P_a ,构成不同参数组合情境,计算相应临界雨量,临界雨量随参数变化趋势图如图2所示。

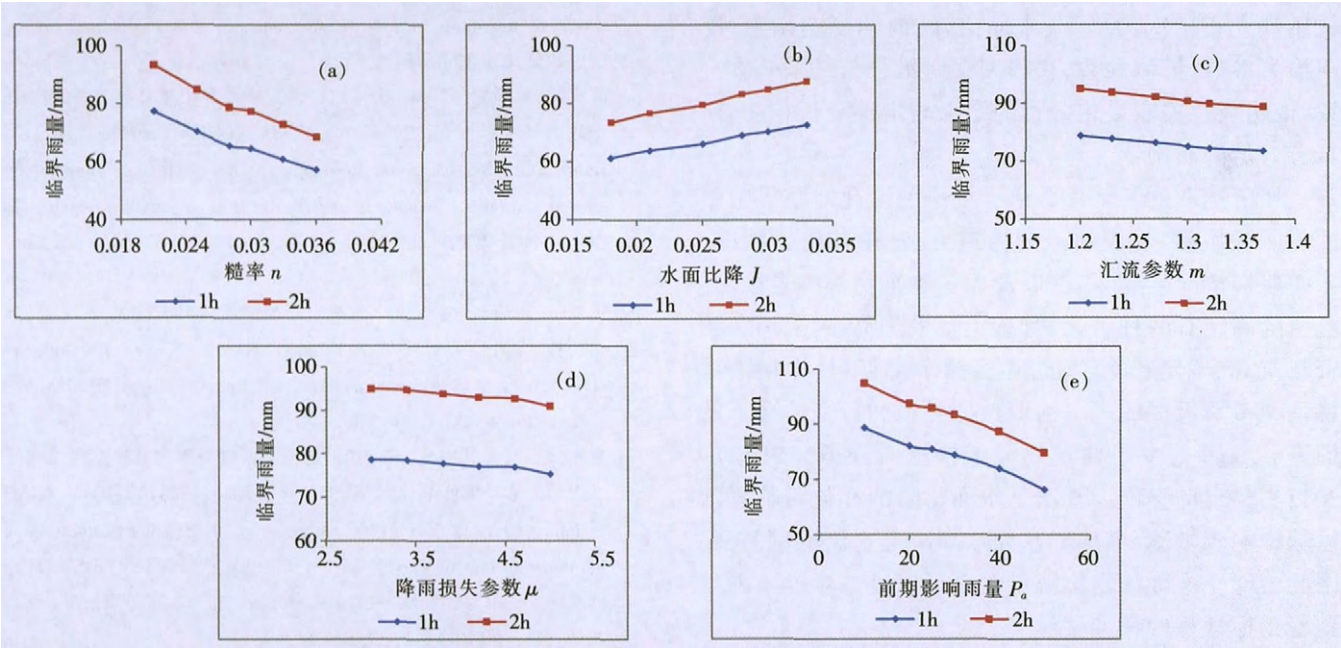


图2 临界雨量随各参数(a.n;b.J;c.m;d.μ;e.P_a)变化图
Fig.2 The relationship between the critical rainfall and different parameters(a.n;b.J;c.m;d.μ;e.P_a)

由图2可以看出,糙率、水面比降及前期影响雨量对临界雨量的影响程度较大,汇流参数和降雨损失参数对临界雨量的影响较小,1h临界雨量与2h临界雨量变化趋势基本一致,其中,水面比降与临界雨量呈正相关性,其他参数与临界雨量呈负相关性。因此,可以初步判断糙率、水面比降及前期影响雨量这三个参数较敏感,汇流参数和降雨损失参数较不敏感。不同参数之间敏感性的大小将通过灰色关联分析法确定。

2.4 灰色关联法结果分析

选取各参数的变化值作为参考数列矩阵 X ,将某一参数变化,而其他参数固定不变的条件下的1h临界

雨量作为被比较数列矩阵 Y ,则

$$X = \begin{matrix} n \\ J \\ m \\ \mu \\ P_a \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0.021 & 0.025 & 0.028 & 0.030 & 0.033 & 0.036 \\ 0.018 & 0.021 & 0.025 & 0.028 & 0.030 & 0.033 \\ 1.20 & 1.23 & 1.27 & 1.30 & 1.32 & 1.37 \\ 3.0 & 3.4 & 3.8 & 4.2 & 4.6 & 5.0 \\ 10 & 20 & 25 & 30 & 40 & 50 \end{bmatrix}$$
$$Y = \begin{bmatrix} 77.4 & 70.4 & 65.5 & 64.5 & 60.8 & 57.1 \\ 61.3 & 63.9 & 66.2 & 69.2 & 70.4 & 72.9 \\ 78.9 & 77.8 & 76.4 & 75.3 & 74.6 & 73.7 \\ 78.6 & 78.5 & 77.8 & 77.1 & 76.9 & 75.3 \\ 88.7 & 82.1 & 80.9 & 78.8 & 74.0 & 66.3 \end{bmatrix}$$

对以上矩阵进行无量纲化处理,通过式(8)~式(9)求得关联系数矩阵 G 为:

$$G = \begin{bmatrix} 0.3838 & 0.4879 & 0.6017 & 0.6321 & 0.7744 & 1.0001 \\ 0.7527 & 0.6506 & 0.5823 & 0.5123 & 0.4882 & 0.4455 \\ 0.3761 & 0.3886 & 0.4066 & 0.4213 & 0.4317 & 0.4454 \\ 0.3920 & 0.3966 & 0.4090 & 0.4221 & 0.4280 & 0.4569 \\ 0.3336 & 0.5057 & 0.6116 & 0.8224 & 0.6011 & 0.3608 \end{bmatrix}$$

最后,由式(10)得关联度矩阵 $r_1 = [0.6467, 0.5719, 0.4116, 0.4174, 0.5392]^T$, 则关联序为 $n > j > P_a > \mu > m$ 。

同理可求得柏树庄 2h 临界雨量与各参数的关联度矩阵 $r_2 = [0.6344, 0.5547, 0.3942, 0.3989, 0.5385]^T$, 关联序为 $n > j > P_a > \mu > m$ 。

由灰色关联度分析可知,影响临界雨量的各参数敏感性大小依次为糙率、水面比降、前期影响雨量、降雨损失参数、汇流参数,这与图2所示分析结果基本一致,说明灰色关联量化分析的结果与定性分析相吻合,具有一定的实用性。

在所选取的5个参数中,糙率的变化对临界雨量的影响最敏感,它由河流的沟道形态、植被生长状况、床面粗糙情况、弯曲程度以及人工建筑物等因素决定。糙率的确定有两种情况,若有实测水文资料,采用实测资料推算,确定糙率值;若无实测水文资料,根据沟道特征,参照天然或人工河道典型类型和特征情况下的糙率,参考《水工建筑物与堰槽测流规范》(SL537-2011),确定糙率值。其次是水面比降的变化对临界雨量的影响较敏感,糙率和水面比降决定水位流量关系,因此,建立准确的水位流量关系可以进一步提高雨量预警指标计算的精准度。

前期影响雨量对于临界雨量的影响程度也是较大的,设计洪水中净雨分析需要考虑前期土壤含水量,当有水文资料时,直接采用水文资料确定土壤含水量,若缺乏水文资料,可以采用前期降雨对流域土壤含水量进行估算。

3 结论

(1) 采用灰色关联法对影响山洪灾害雨量预警指标制定的5个主要参数进行了敏感性分析,结果表明糙率和水面比降的影响权重较大。因此在制定山洪灾害雨量预警指标时,重点分析糙率、水面比降选取的准确性和合理性是提高预警精度的重要环节。

(2) 本文对影响山洪灾害雨量预警指标的参数进行了单因子的敏感性分析,原理简单,可操作性强,对

样本容量没有特殊要求,具有一定的实用性,但是未考虑参数间的互相影响,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵然杭,王敏,陆小蕾.山洪灾害雨量预警指标确定方法研究[J].水电能源科学, 2011,29(9):49-53. (ZHAO Ranhang, WANG Min, LU Xiaolei. Research on determination method for rainfall warning indexes of torrential flood disaster [J]. Water Resources and Power, 2011,29(9):49-53. (in Chinese))
- [2] 陈志波,简文彬.边坡稳定性影响因素敏感性灰色关联分析[J].防灾减灾工程学报, 2006,26(4):473-477. (CHEN Zhibo, JIAN Wenbin. Sensibility analysis of slopes stability based on grey correlation analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006,26(4):473-477. (in Chinese))
- [3] 全国山洪灾害防治项目组.山洪灾害分析评价方法指南[R]. 2015. (Project Team of National Mountain Torrent Disaster Prevention. Guide of mountain torrent disaster analysis and evaluation method [R]. 2015. (in Chinese))
- [4] 陈真莲,黄国如,成国栋.小流域山洪灾害临界雨量计算分析方法[J].中国农村水利水电, 2014,(6):82-85. (CHEN Zhenlian, HUANG Guoru, CHENG Guodong. Research on the calculation methods for critical rainfall of mountain torrent disasters of small watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014,(6):82-85. (in Chinese))
- [5] 王文圣,张翔,金菊良,等.水文学不确定性分析方法[M].北京:科学出版社, 2011. (WANG Wensheng, ZHANG Xiang, JIN Juliang, et al. Methods of Uncertainty Analysis for Hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [6] 赵永虎,程佳,韩龙武,等.基于灰色关联度的青藏高原黏性土冻胀率影响因素敏感性分析[J].铁道建筑, 2016,(3):100-103. (ZHAO Yonghu, CHENG Jia, HAN Longwu, et al. Sensitivity analysis of influence factors of clayey soil frost heaving ratio in Qinghai-Tibet Plateau based on grey relational degree [J]. Railway Engineering, 2016,(3):100-103. (in Chinese))
- [7] 河南省水文水资源局.河南省暴雨参数图集[M].郑州:黄河水利出版社, 2005:5-6. (Hydrology and Water Resources Bureau of Henan Province. Atlas of Rainstorm Parameters in Henan Province [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2005:5-6. (in Chinese))
- [8] 崔钉钉.浮梁县山洪灾害预警转移研究[D].南昌:南昌大学, 2016. (CUI Dingding. Study on Flash Flood Disaster Warning Transfer of Fuliang County [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. (in Chinese))
- [9] 王新宏,唐永鹏,张美洋,等.基于水位/流量反推法的资料匮乏地区临界雨量研究[J].水资源与水工程学报, 2016,27(4):125-128. (WANG Xinhong, TANG Yongpeng, ZHANG Meiyang, et al. Research on critical rainfall in data deficient region based on inversion method of water level/flow [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016,27(4):125-128. (in Chinese))
- [10] 王俊卿,李靖,李琦,等.黄土高边坡稳定性影响因素分析——以

- 宝鸡峡引水工程为例[J].岩土力学, 2009,30(7):2114-2118.
(WANG Junqing, LI Jing, LI Qi, et al. Analysis of influence factors of high slope stability of loess: taking the Baojixia Water Division Project for example [J]. Rock Soil Mechanics, 2009,30(7):2114-2118. (in Chinese))
- [11] 谭学瑞,邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J]. 统计研究, 1995,12(3):46-48. (TAN Xuerui, DENG Julong. Grey connected analysis: a new method of multifactor statistical analysis [J]. Statistical Research, 1995,12(3):46-48. (in Chinese))
- [12] 曹明霞. 灰色关联分析模型及其应用的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007. (CAO Mingxia. Research on Grey Incidence Analysis Model and Its Application [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese))
- [13] 赵永虎,米维军,武小鹏,等. 基于灰色关联度分析粉质黏土融沉系数影响因素敏感性分析[J]. 施工技术, 2016,45(S1):353-355. (ZHAO Yonghu, MI Weijun, WU Xiaopeng, et al. The sensitivity analysis for the influence factors of thawing settlement coefficient of silty clay in Lanzhou area based on the grey correlation degree [J]. Construction Technology, 2016,45(S1):353-355. (in Chinese))

Sensitivity Analysis of Influence Factors of Rainfall Warning Index for Flash Flood Disasters

WANG Dan¹, MA Xixia¹, LIU Changjun²

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

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper took five factors including antecedent precipitation index, river roughness, water surface slope, confluence parameter and loss parameter in the calculation of rainfall warning index of flash flood disasters and employed the trend analysis and grey correlation analysis methods to analyze the sensitivities of the factors. The Beigouhe Watershed in Henan Province was taken as a case study. The results show that the factors influencing the rainfall warning index in turn are river roughness, water surface slope, antecedent precipitation index, loss parameter, confluence parameter. And the roughness should be selected as the most sensitive factor in the calculation of the rainfall warning index for flash flood. The study is significant to improve the accuracy of rainfall warning index.

Key words: flash flood disaster; rainfall warning index; sensitivity analysis

《水文》杂志征订启事

《水文》杂志是由水利部主管,水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心)主办,国内外公开发行的我国水文水资源专业的学术性科技期刊,系我国地球物理学类和水利工程类全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊、中国期刊网和“万方数据——数字化期刊群”入网期刊。

刊登内容:水文水资源基础理论研究,水文站网规划设计,水文测验技术,水文资料处理与服务,水文水资源分析计算,水文情报预报,水资源调查评价,水环境、水生态监测与水质预测,新技术在水文水资源方面的应用,测验仪器设备的研制,国内外水文水资源科技进展综述、评述以及有关信息和动态等。

出版发行:《水文》杂志为双月刊,每逢双月25日出版,国内由北京报刊发行局总发行,全国各地邮局均可办理订阅手续,邮发代号:2-430,每册定价20元,全年共120元;国外由中国国际图书贸易总公司(地址:北京399信箱,邮政编码:100044)发行,代号:BM511。

通讯地址:北京市白广路二条2号,100053,电话:(010)63203550;传真:(010)63204559

E-mail:j.hyd@mwr.gov.cn

投稿网址:http://sw.allmaga.net/ch/index.aspx