

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.003

多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法

徐晋轩^{1,2,3}, 李一阳¹, 潘兴瑶¹, 陈楠^{1,4}, 吕海深^{2,3}, 杨默远¹, 李炳华¹, 李珠^{1,5}

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;

3. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 4. 北京工业大学城建学部, 北京 100124;

5. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西太原 030024)

摘要: 针对场次降雨水资源量评价与年尺度水资源量评价成果的不协同问题, 通过分割前期降雨径流退水和年尺度基流等径流成分, 提出场次降雨过程水资源量评价新方法, 实现场次降雨水资源量的精细化评价。将该评价方法应用于潮白河典型区间流域, 结果表明该方法具有较好的适应性, 能够显著提高场次降雨水资源量评价成果的针对性和准确度, 满足多时空尺度协同的水资源量评价需求。

关键词: 多时空尺度; 场次降雨; 水文模型; 径流分割; 水资源评价; 潮白河

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)01-0019-07

Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination

XU Jinxuan^{1,2,3}, LI Yiyang¹, PAN Xingyao¹, CHEN Nan^{1,4}, LYU Haishen^{2,3}, YANG Moyuan¹, LI Binghua¹, LI Zhu^{1,5}

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Faculty of Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

5. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the inconsistency between the results of precipitation water resources assessment and annual scale water resources assessment, a new evaluation method of precipitation water resource is proposed in this paper by splitting the runoff components such as antecedent precipitation recession and annual scale base flow, in order to realize the refined evaluation of precipitation water resources. The analysis results in the typical basin of Chaobai River show that the method has good adaptability, significantly improve the pertinence and accuracy of the assessment results of precipitation water resources, and fulfills the needs of water resources assessment with multiple temporal and spatial scale coordination.

Key words: multiple temporal and spatial scales; precipitation; hydrological model; hydrograph separation; water resources assessment; Chaobai River

在社会人口激增与经济快速发展的背景下, 全面科学地评价区域水资源量是水资源优化配置、精细化调度和取水管控等水资源管理工作的重要基础^[1-7]。依据 SL/T 238—1999《水资源评价导则》等文件, 传统的水资源评价主要依据历史监测数据, 通过水量平衡等方法开展年尺度水资源量的核算。由于对有限历史监测数据的依赖, 传统方法不便开展子流域和行政区嵌套单元的精细化评价, 不能及时掌握场次降雨过程形成的新增水资源量, 无法支撑多时空尺度协同的水资源精细化管控需求。

为了实现空间尺度上的水资源精细化评价目标, 国内外学者引入流域分布式水文模型进行水资源评价。贾仰文等^[8]利用天然-人工二元水循环系统评价了全黄河流域内 6 个主要水文站的多年平均径流过程; 王忠静等^[9]利用分布式水文模型评价了永定河山区 4.17 万 km²流域面积内不同时期下垫面条件的年尺度降雨

基金项目: 国家自然科学基金(41730749, 41830752, 42071033); 国家重点研发计划(2019YFC1510504, 2019YFC0408703)

作者简介: 徐晋轩(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xjx1015987989@163.com

通信作者: 杨默远(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: ymoyuan@163.com

引用本文: 徐晋轩, 李一阳, 潘兴瑶, 等. 多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1):19-25.

XU Jinxuan, LI Yiyang, PAN Xingyao, et al. Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1):19-25.

产流关系;桑学峰等^[10-11]通过构建水资源调配与模拟模型(WPS),将庆阳市8个行政区分为141个水文计算单元,评价分析了各行政区2010年水资源配置情况;许继军^[12]利用分布式水文模型将长江上游流域划分为177个子流域,评价分析了流域内10个主要水文站的多年平均径流过程以及流域径流深、蒸散发、土壤含水量的演变规律。由此可见,利用分布式水文模型能够较好地解决多空间尺度的水资源评价需求,但在场次降雨尺度水资源评价方面,由于评价时段难以确定、多尺度径流成分较为复杂等问题,导致了场次降雨和年尺度水资源评价成果不协同。

本文在利用流域分布式水文模型进行精细化评价单元水资源量核算的基础上,考虑前期降雨的径流退水量和年尺度基流量的影响,提出针对某一具体待评价场次降雨所形成水资源量的核算方法。将该方法应用于潮白河典型区间流域,初步验证其适用性,并提出了多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价技术路径。

1 场次降雨水资源量评价方法

1.1 评价思路

水资源量具有突出的空间和时间尺度特征^[13]。在空间尺度方面,不仅包括从水文学角度划分的各级流域,还包括从政府管理角度划分的省、市、县等各级行政区划,精细化的水资源管理要求掌握流域和行政区划嵌套单元对应的水资源量。由于水资源量形成过程存在逐级细化且可分割的空间边界,因此通过分布式水文模型能够得到空间尺度协同的水资源评价成果。

在时间尺度方面,当水资源评价对象由年尺度降为场次降雨尺度后,由于评价时段内径流过程不仅包含待评价场次降雨所形成的径流过程,还包含前期场次降雨的径流退水过程和年尺度基流过程等不同径流成分,导致水资源评价成果在时间尺度上难以协同。解决时间尺度协同的关键在于从实测或模拟径流序列中分割待评价场次降雨形成的径流过程、前期场次降雨形成的退水过程和年尺度基流过程等径流成分。

连续两场降雨对应的径流过程如图1所示,对持续时间为 T_h 的降雨所形成的径流过程进行水资源量评价时,需要分别确定前期降雨影响时间(即场次降雨径流退水过程持续时间, T_i)、待评价场次径流过程(R_h)、待评价场次待评价时段内的前期降雨退水过程(R_{h+1})和年尺度基流过程($R_{基}$);通过计算上述径流过程以核算场次降雨形成水资源量时需要将退水量(W_{h+1})、基流量($W_{基}$)从水资源量(W_h)中剔除,避免重复计算退水量以及基流量中不属于本场降雨所形成的水资源量。

1.2 总体技术方案

场次降雨水资源评价研究方法步骤(图2)如下:
①通过基流分割方法分析年尺度径流监测数据,确定评价区域 $R_{基}$;②以降雨强度、降雨时间间隔、洪峰流量为筛选指标选取待评价区域内实测历史典型场次降雨径流过程;③依据流域产汇流特征确定 T_i ;④利用SWMM、MIKE、SWAT等分布式水文模型,以及历史典型场次降雨数据确定模型参数;⑤根据评价需求分别确定待评价区域、待评价场次降雨,通过模型模拟与实测资料确定 R_{h+1} 与 R_h ;⑥将 R_{h+1} 与 $R_{基}$ 从径流过程中剔除,基于分割后径流过程核算的水资源量即为场次降雨过程水资源量。

1.3 关键技术环节

1.3.1 年尺度基流确定

基流是河川径流的主要补给来源,维持河川基流量对流域生产、生活稳定供水和生态环境保护具有重要的作用,不同流域的河道基流占流域总径流量的比例均不同^[14-15]。在进行场次降雨水资源量评价时,河道基流量不属于该场降雨所形成的水资源量,为得到更精

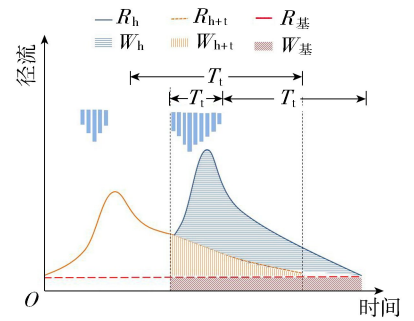


图1 场次降雨径流关键组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of key components of precipitation-runoff

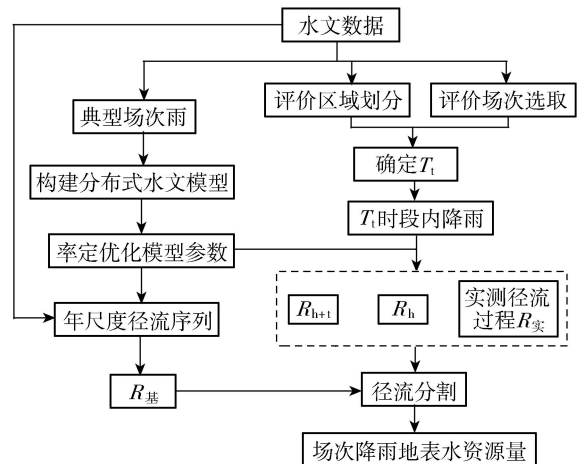


图2 场次降雨水资源评价流程

Fig.2 Water resources evaluation process of precipitation

确的水资源量核算结果,需要定量确定流域河道基流。

考虑不同产流区域的水文地质条件及流域产流过程差异,国内外学者展开了大量有关基流确定问题的研究^[16]。冷梦辉等^[17]对比分析了四类检验法应用于基流分割中的适应性,发现应用 Pettitt 法分割的准确度最高;马晓婧等^[18]利用改进常数后的 C-M 法,对拒马河流域的日径流过程进行了基流分割;左海凤等^[19]通过计算机开发的 BFI 程序对河岔水文站的日径流过程进行了基流分割;王京晶等^[20]通过水平分割法确定基流,分析基流分割前后对于城市雨洪模拟结果的影响。无论直线分割法、水量平衡法或时序分析法等均可对历史监测年尺度径流数据进行分析,在实际计算时应根据研究区特点和数据资料情况综合选择计算方法以确定年尺度基流^[21-22]。

1.3.2 径流过程与退水过程模拟

a. 分布式水文模型构建。水文模型是研究流域产汇流特征的重要工具之一,国内外学者针对不同典型流域先后提出一系列集总式、分布式水文模型,如 Sacramento 模型、Tank 模型、新安江模型、SHE 模型、SWAT 模型等。其中,分布式水文模型充分考虑了降雨与下垫面空间的不均性,能全面反映空间尺度上的水文过程,有利于分析不同下垫面条件的流域产汇流规律,实现水资源评价的时空精细化需求。

b. 模型率定与参数优化。利用水文模型模拟径流的主要误差来源于模型参数的不确定性,采用长时间序列的实测资料率定水文模型参数后,部分参数是变化、不固定的^[23]。通过选取适合的参数优化算法,在检验模拟结果与实测结果一致性的同时,不断调整模型参数,使计算结果不断逼近实测结果,得到优化后的模型参数。参数优化方法主要分为人工试错法与基于计算机的自搜索类算法,人工试错法由于主观性强、效率低逐渐被自搜索算法所取代^[24]。罗森布尔朗科法、遗传算法、单纯形法、粒子群法等均为常用的自搜索算法,广泛应用于流域水文模型参数优化的研究中^[25-29]。

c. 径流模拟分析。 R_h 通过模拟 T_h 内降雨径流过程确定,在选取待评价场次降雨、细分确定待评价区域后,利用率定后的模型计算待评价场次径流过程。 R_{h+1} 是水文过程的重要组成部分,退水过程分析被广泛应用于水资源评价、水文计算中,确定 T_l 是退水分析模拟的关键^[30-32]。根据评价区域产汇流特征确定 T_l 后,将 T_h 向前延长得到 T_l ,通过率定后的模型模拟 T_l 时段内降雨形成的径流过程,该径流过程就是前期降雨的退水过程。

1.3.3 径流分割与水资源量核算

在模拟径流过程与退水过程后,径流分割的主要步骤(图3)如下:

a. 以有无前期降雨和有无实测径流作为判断条件,设定4种径流过程与退水过程模拟情景:
①无降雨、无实测资料,则仅模拟待评价场次径流过程 R_h ;②无降雨、有实测资料,则不模拟 R_{h+1} ,用实测径流过程 $R_{实}$ 代替 R_h ;③有降雨、无实测资料,则模拟 R_{h+1} 及 R_h ;④有降雨、有实测资料,仅模拟 R_{h+1} ,用 $R_{实}$ 代替 R_h 。

b. 计算流域 $R_{基}$ 。

c. 进行考虑退水过程、年基流过程的径流分割,核算待评价场次降雨水资源量。

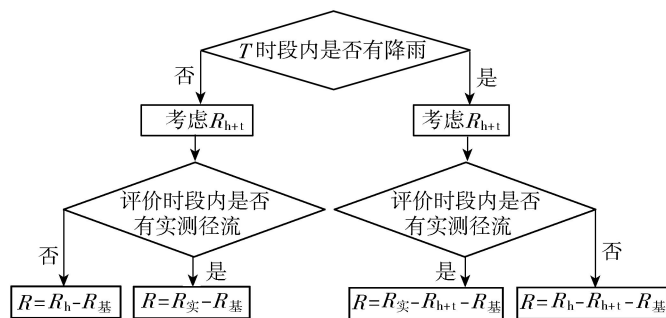


图3 不同情景下的径流分割

Fig. 3 Hydrograph separation under different scenarios

2 实例应用

2.1 研究区域概况

选取地处华北平原的潮白河白河堡水库至张家坟水文站区间流域为研究区域,位于北京市和张家口市交界处,流域总面积约为 4583 km²,植被类型以森林、灌木和草地为主,整体地势北高、东南低,地形以低山和中山为主(图4)。

流域气候类型属于半湿润半干旱的大陆性季风气候,多年平均降水量为 511 mm,6—9 月降雨占年降水量的 75% 以上,降水量年内分配不均,汛期暴雨强度大且历时短。流域下游的密云水库是北京市重要的水源地,近年来北京市水资源开发利用形势严峻。通过模型模拟水库上游流域径流过程并进行流域典型场次降雨水资源量评价,对认识密云水库上游流域的水循环规律、开展北京市水资源的精细化调配具有重要意义^[33]。

2.2 计算过程

a. 年尺度基流确定:①收集潮白河流域内共 19 个水文站 1983—2017 年实测汛期降雨序列(小时)、流域出口张家坟站径流序列(小时、日);②绘制张家坟站日径流过程线,选择适用性较强的水平分割法划分 $R_{基}$ [34-36] (图 5)。

b. 径流过程与退水过程模拟:①采用 GIS 10.5 工具生成汇水区(56 个)、河网(377 条)的 SHP 多级图层,将各级图层导入基于 SWMM 模型计算内核研发的雨洪模拟平台,完成分布式水文模型的搭建。②以暴雨量级、降雨间隔时间、径流系数为关键指标,筛选流域汛期典型场次降雨共 47 场。③通过计算各场次前 3~21 d 内降水量与径流系数的相关系数,确定前期雨量影响时间阈值为 9 d。④利用遗传算法优化模型参数,所率定的参数为不渗透/渗透区洼地蓄水、不渗透/渗透区曼宁系数、河道曼宁系数、霍顿下渗公式(f_{∞}, f_0, K),选取的优化效果评价指标为纳什效率系数、体积误差等。利用其中 30 场数据进行参数率定,平均纳什效率系数为 0.74,剩余 17 场验证参数,平均纳什效率系数为 0.69。以 1991 年 8 月 8 日为例进行参数优化效果对比(图 6),由图 6 可见,参数优化取得了较为理想的效果,径流模拟值与实测值纳什效率系数为 0.71,径流模拟峰值为 $66.46 \text{ m}^3/\text{s}$,实测峰值为 $70.2 \text{ m}^3/\text{s}$,相对误差为 5.33%。⑤通过模拟待评价场次降雨的径流过程确定 R_{h_t} ,通过模拟待评价场次前 9 d 降雨的径流过程确定 $R_{h_{t+1}}$ 。

c. 径流分割与水资源量核算:①考虑前期降雨退水过程、年尺度基流过程完成径流分割。②基于分割后的径流过程核算场次降雨水资源量。部分场次降雨径流过程如图 7 所示,降雨开始时间为 1984 年 6 月 30 日的场次降水量为 69.85 mm,场次水资源量、退水量、基流量分别为 1732.4 万 m^3 、 227.9 万 m^3 、 255.5 万 m^3 ;降雨开始时间为 2015 年 9 月 4 日的场次降水量为 103.65 mm,场次水资源量、退水量、基流量分别为 3382.9 万 m^3 、 370.21 万 m^3 、 237.25 万 m^3 。

2.3 评价结果

场次降水量均值为 58.29 mm,平均场次径流总量为 2124.16 万 m^3 (折算径流深 4.63 mm),平均场次水资源量为 1637.94 万 m^3 (折算径流深 3.57 mm)。其中,场次水资源量最小值为 547.52 万 m^3 (折算径流深 1.19 mm),降水量为 21.25 mm;场次水资源量最大值为 3698.75 万 m^3 (折算径流深 8.07 mm),降水量为 117.28 mm。此外,场次水资源量占场次径流总量的平均比例为 75.55%,前期降雨退水量和基流量的平均占比为 11.35% 和 13.10%,47 个场次降雨过程的降水量与水资源量、径流总量的关系如图 8 所示。由图 8 可见,场次降水量与场次水资源量、场次径流总量呈多项式相关且相关关系较好,场次降水量大小是场次水资源量的主要影响因素。场次水资源量与场次径流总量间存在相对固定的系统性误差,这样的误差主要是前期降雨退水量和基流量造成的。

根据 GB/T 28592—2012《降水量等级》,按 24 h 内降水量分别为 25 mm、50 mm、100 mm 划分降水量级,将

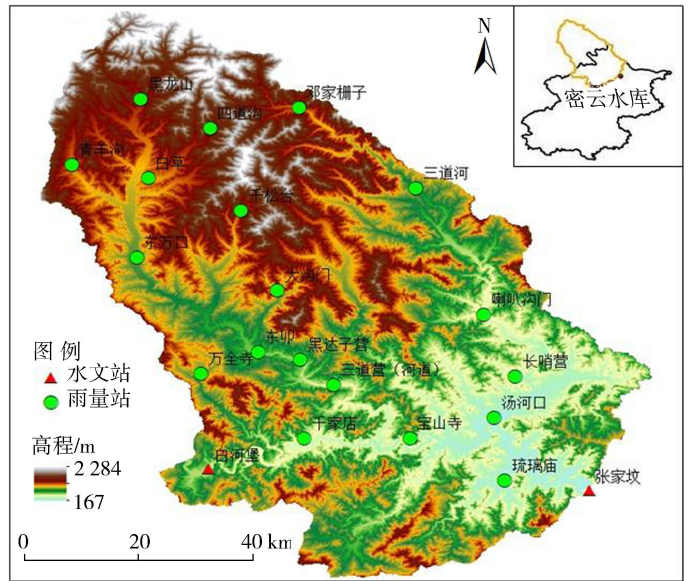


图 4 潮白河典型区间流域

Fig. 4 Typical interval basin of Chaobai River

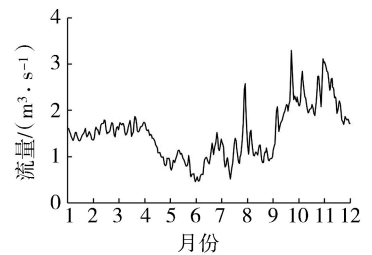


图 5 潮白河区间流域年尺度基流过程

Fig. 5 Annual base flow process of typical interval basin of Chaobai River

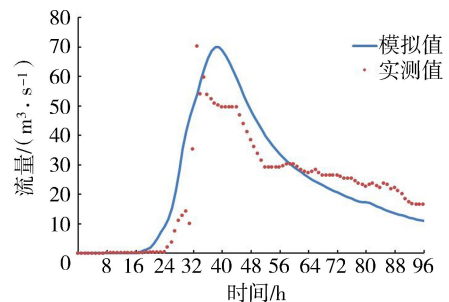


图 6 以 1991 年 8 月 8 日为例的参数优化效果对比

Fig. 6 Comparison of parameter optimization effects taking August 8, 1991 as an example

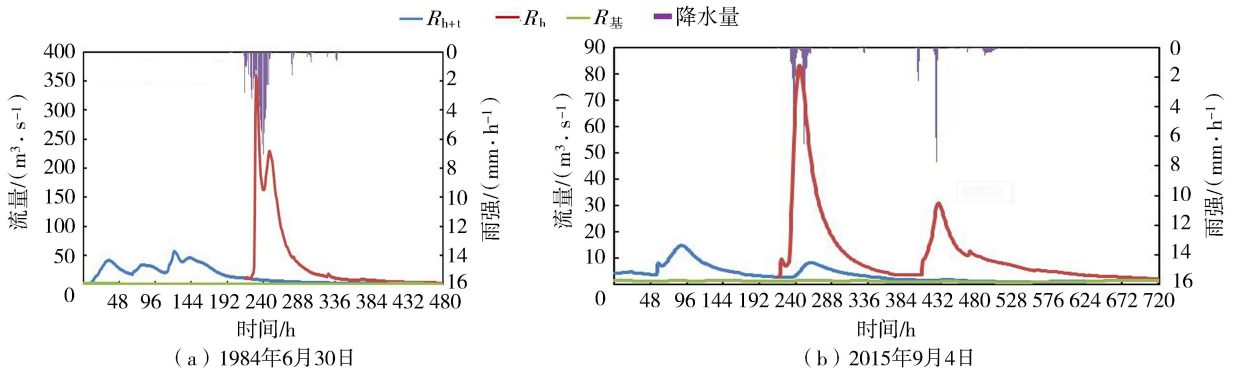


图 7 场次降雨径流过程

Fig. 7 Precipitation and runoff process of precipitation events

典型降雨划分为大雨、暴雨、大暴雨 3 类。参照该标准,47 场降雨中大雨为 21 场,暴雨 21 场,大暴雨 5 场。随着降水量级下降,场次水资源量平均占比由大暴雨的 87.61% 下降至大雨的 69.70%,前期降雨退水量平均占比、基流量平均占比分别由 4.99% 和 7.39% 上升至 14.43% 和 15.87% (图 9),说明在现有水资源评价研究中,不区分前期退水过程与年基流过程的水资源量核算会造成场次降雨水资源量与年尺度水资源量的不协同;年尺度水资源评价中重复计算的水资源量,在场次水资源评价中会对评价结果产生误差,而通过分割后的径流过程核算水资源量,可以达到提升不同降水量级评价结果精度的目的(大雨、暴雨、大暴雨分别提升 30.30%、21.46%、12.39%)。

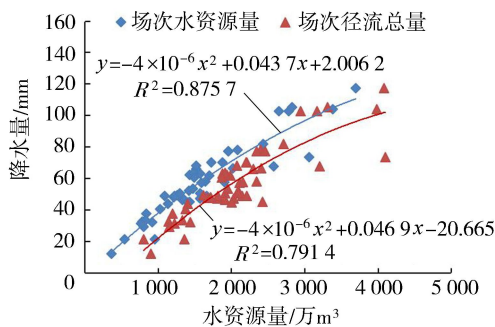


图 8 降水量与场次水量、场次径流总量散点图

Fig. 8 Scatter plot of precipitation, water volume and total runoff volume

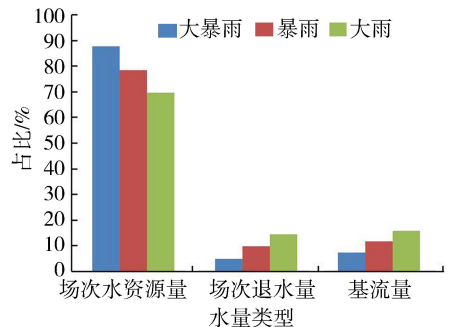


图 9 不同降水量级下各径流组分占比

Fig. 9 Percentage of each runoff component under different rainfall levels

3 结 论

综合运用分布式水文模型等技术手段,本文提出了一套多时空尺度协同的场次降雨水资源精细化评价方法,主要包括年尺度基流确定、径流过程与退水过程模拟和径流分割与水资源量评价 3 个主要技术环节。该方法能够准确分割待评价场次降雨时段内形成的径流过程、前期场次降雨形成的径流退水过程和年尺度基流过程等径流成分,实现了可选择评价单元和时段内的水资源量精细化评价。

在潮白河典型区间流域开展应用分析,评价了 47 场典型降雨过程的水资源量,结果表明:①通过将水资源量计算结果折算成径流深,场次降水量、径流总量和水资源量均值分别为 58.29 mm、4.63 mm 和 3.67 mm,随着降雨量级由大雨增加至大暴雨,场次水资源量占场次径流总量的比例由 69.70% 增加至 87.61%;②前期降雨径流退水量和基流量是导致传统场次降雨水资源量评价结果存在误差的主要原因,两者占径流量的比例分别为 12.10% 和 13.78%。本文提出的方法能够显著提高场次降雨水资源量评价成果的针对性和准确度,满足多时空尺度协同的水资源评价需求。

参考文献:

[1] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. 水利学报,2019,50(8):980-989. (WANG Hongrui,

- QIAN Longxia,ZHAO Ziyang, et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(8):980-989. (in Chinese)
- [2] 王浩,游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报,2008,385(10):1168-1175. (WANG Hao, YOU Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,385(10):1168-1175. (in Chinese))
- [3] 陈太政,侯景伟,陈准. 中国水资源优化配置定量研究进展[J]. 资源科学,2013,35(1):132-139. (CHEN Taizheng, HOU Jingwei, CHEN Zhun. Quantitative studies of the optimization allocation of water resources in China; a review[J]. Resources Science,2013,35(1):132-139. (in Chinese))
- [4] 姜秋香,何晓龙,王子龙,等. 基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):1-7. (JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, et al. A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):1-7. (in Chinese))
- [5] 左其亭,胡德胜,窦明,等. 基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系[J]. 资源科学,2014,36(5):906-912. (ZUO Qiting, HU Desheng, DOU Ming, et al. Framework and core system of the most stringent water resources management system based on the concept of human-water harmony[J]. Resources Science, 2014,36(5):906-912. (in Chinese))
- [6] 王红瑞,李一阳,杨亚锋,等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护,2022,38(1):18-25. (WANG Hongrui, LI Yiyang, YANG Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):18-25. (in Chinese))
- [7] 龚艳冰. 基于正态云组合赋权的水资源配置方案综合评价方法[J]. 水资源保护,2022,38(2):56-61. (GONG Yanbing. Comprehensive evaluation method of water resource allocation schemes based on normal cloud combination weighting[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):56-61. (in Chinese))
- [8] 贾仰文,王浩,王建华,等. 黄河流域分布式水文模型开发和验证[J]. 自然资源学报,2005,20(2):300-308. (JIA Yangwen, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Development and verification of a distributed hydrological model for the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources,2005,20(2):300-308. (in Chinese))
- [9] 王忠静,杨芬,赵建世,等. 基于分布式水文模型的水资源评价新方法[J]. 水利学报,2008,39(12):1279-1285. (WANG Zhongjing, YANG Fen, ZHAO Jianshi, et al. New approach for water assessment based on distributed hydrological model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(12):1279-1285. (in Chinese))
- [10] 桑学锋,王浩,王建华,等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I):模型原理与构建[J]. 水利学报,2018,49(12):1451-1459. (SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part I :theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(12):1451-1459. (in Chinese))
- [11] 桑学锋,赵勇,翟正丽,等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(II):应用[J]. 水利学报,2019,50(2):201-208. (SANG Xuefeng, ZHAO Yong, ZHAI Zhengli, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part II : application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(2):201-208. (in Chinese))
- [12] 许继军. 分布式水文模型在长江流域的应用研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [13] 鲍超,贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展,2017,36(1):58-67. (BAO Chao, HE Dongmei. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Advances in Geographical Sciences,2017,36(1):58-67. (in Chinese))
- [14] 刘新有,谢飞帆. 基于数字滤波法的怒江流域基流时空分异[J]. 水资源保护,2017,33(1):18-23. (LIU Xinyou, XIE Feifan. Spatial-temporal differentiation of base flow in nujiang river basin based on digital filtering method[J]. Water Resources Protection,2017,33(1):18-23. (in Chinese))
- [15] 夏军,刁艺璇,余敦先,等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护,2022,38(3):1-8. (XIA Jun, DIAO Yixuan, SHE Dunxian, et al. Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):1-8. (in Chinese))
- [16] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. 应用生态学报,2011,2(11):3073-3080. (XU Leilei, LIU Jinglin, JIN Changjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological processes research;a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,2(11):3073-3080. (in Chinese))
- [17] 冷梦辉,白桦,李二辉,等. 洪水基流分割非参数检验方法优选[J]. 水资源保护,2021,37(4):82-88. (LENG Menghui, BAI hua, LI Erhui, et al. Optimization of nonparametric test methods for flood base flow segmentation[J]. Water Resources Protection, 2021,37(4):82-88. (in Chinese))
- [18] 马晓婧,刘强,潘继花,等. 基于数字滤波法的拒马河基流分割及演变规律研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),

- 2020,56(5):659-663. (MA Xiaojing, LIU Qiang, PAN Jihua, et al. Baseflow separation and temporal changes in the Juma River, China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2020,56(5):659-663. (in Chinese))
- [19] 左海凤,武淑林,邵景力. 山丘区河川基流 BFI 程序分割方法的运用与分析:以汾河流域河岔水文站为例[J]. 水文,2007(1):69-71. (ZUO Haifeng, WU Shulin, SHAO Jingli. Application of computerized base-flow separation method with BFI program in mountains areas[J]. Hydrology, 2007(1):69-71. (in Chinese))
- [20] 王京晶,徐宗学,赵刚,等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty of urban storm flood simulation[J]. Water Resources Protection, 2022,38(5):65-71. (in Chinese))
- [21] 徐榕焱,王小刚,郑伟. 基流分割方法研究进展[J]. 水土保持通报,2016,36(5):352-359. (XU Rronghan, WANG Xiaogang, ZHENG Wei. Research progresses of base flow separation methods[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(5):352-359. (in Chinese))
- [22] 王红瑞,曹玲玲,许新宜,等. 基于梯形模糊数的不确定性河道生态需水模型及其应用[J]. 水利学报,2011,42(6):657-665. (WANG Hongrui, CAO Lingling, XU Xinyi, et al. An uncertain model for ecological water demand of river based on trapezoidal fuzzy numbers and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(6):657-665. (in Chinese))
- [23] MERZ R, PARAJKA J, BLOESCHL G. Time stability of catchment model parameters: implications for climate impact analyses [J]. Water Resources Research, 2011,47(2):2144-2150.
- [24] 孙倩莹. 概念性水文模型参数率定及滚动预报修正研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [25] 杨薇,南军,孙德智,等. 遗传算法在水资源与水环境研究中的应用综述[J]. 水资源保护,2007,23(1):13-16. (YANG Wei, NAN Jun, SUN Dezhi, et al. Application of genetic algorithm in the fields of water resources and water environment[J]. Water Resources Protection, 2007,23(1):13-16. (in Chinese))
- [26] 余宇峰,胡健伟,严琳,等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):34-41. (YU Yufeng, HU Jianwei, YAN Lin, et al. Research and application of service encapsulation method of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(4):34-41. (in Chinese))
- [27] 李德龙,程先云,杨浩,等. 人工智群算法在水文模型参数优化率定中的应用研究[J]. 水利学报,2013,44(增刊1):95-101. (LI Delong, CHENG Xianyun, YANG Hao, et al. Study on artificial intelligence optimization algorithms for auto-calibration of hydrological model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(Sup1):95-101. (in Chinese))
- [28] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (WANG Hongrui, WEI Haoshan, HU Litang, et al. Improved model and application of SVM-AR on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2020,48(6):488-497. (in Chinese))
- [29] 王琰,丁永生,孔乔. 分布式水文模型多参数优化与不确定性分析[J]. 大连海事大学学报,2020,46(2):96-106. (WANG Yan, DING Yongsheng, KONG Qiao. Multi-parameter optimization and uncertainty analysis of distributed hydrological models[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020,46(2):96-106. (in Chinese))
- [30] 李发东,宋献方,刘昌明,等. 华北典型山区坡地径流的退水过程研究[J]. 北京林业大学学报,2006(2):79-84. (LI Fadong, SONG Xianfang, LIU Changming, et al. Discharge recession from runoff plots in representative mountain area in north China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006(2):79-84. (in Chinese))
- [31] 吕乐婷,彭秋志,郭媛媛,等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. 自然资源学报,2014,29(10):1746-1757. (LYU Leting, PENG Qiuzhi, GUO Yuanyuan, et al. runoff simulation of Dongjiang River Basin based on the soil and water assessment tool[J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(10):1746-1757. (in Chinese))
- [32] ANA C S, MARAI M P, ANDREEA R, et al. Estimation of streamflow recession parameters: new insights from an analytic streamflow distribution model[J]. Hydrological Processes, 2019,33(11):1595-1609.
- [33] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报,2012,43(11):1312-1321. (LIN Kairong, HE Yanhu, CHEN Xiaohong. Identifying the quantitative effect of climate change and human activity on runoff in the Dongjiang River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(11):1312-1321. (in Chinese))
- [34] 赵思晗. 华北半湿润山区西台子实验流域产流机制研究[D]. 北京:清华大学,2019.
- [35] 张泳华,刘祖发,赵铜铁钢,等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. 水资源保护,2020,36(4):75-81. (ZHANG Yonghua, LIU Zufa, ZHAO Tongtiegang, et al. Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020,36(4):75-81. (in Chinese))
- [36] 张先荣,曾成,狄永宁,等. 喀斯特地区流域洪水退水过程分析:以贵州省黄洲河流域为例[J]. 人民长江,2021,52(1):56-62. (ZHANG Xianrong, ZENG Cheng, DI Yongning, et al. Analysis flood regression progress in karst watershed-case of Huangzhou River Basin in Guizhou Province[J]. Yangtze River, 2021,52(1):56-62. (in Chinese))