

基于时变矩模型的湄公河上游非一致性洪水频率分析

龙云舒¹, 叶长青², 李运刚¹, 熊合勇³, 赵承远³

(1. 云南大学 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650504; 2. 海南大学 生态与环境学院, 海南 海口 570228; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要: 以湄公河上游为研究案例, 基于清盛水文站 1960–2019 年逐日流量观测数据, 采用时变矩模型进行非一致性洪水频率分析, 探讨梯级水库建设对洪水频率的影响。结果表明: 清盛水文站年最大日流量序列呈显著减小的非一致性特征; 清盛水文站广义逻辑斯谛分布搭配均值具有线性趋势的模型拟合最优; 与传统频率分析方法相比, 时变矩方法计算得到的 100 年一遇设计流量随时间呈减小趋势, 重现期随时间呈上升趋势。湄公河上游梯级水库尤其是糯扎渡水库运行后明显减小了清盛水文站 100 年一遇的洪峰流量, 对下游防洪具有积极作用。

关键词: 水文频率; 非一致性; 时变矩模型; 概率分布函数; 湄公河上游

中图分类号: TV122⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2022)04-0091-06

Non-stationary flood frequency analysis of the upper reaches of Mekong River based on time-varying moment model

LONG Yunshu¹, YE Changqing², LI Yungang¹, XIONG Heyong³, ZHAO Chengyuan³

(1. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650504, China;
2. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China;
3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: This study presented a framework to select a suitable time-varying moment (TVM) model for non-stationary flood frequency analysis based on the daily flow observation data at Chiang Saen Station, Mekong River from 1960 to 2019, the impacts of cascade reservoir construction on the flood frequency were further explored. The results showed that the annual maximum daily flow series of Chiang Saen Station exhibited a significant decreasing trend ($p < 0.01$); the combination of generalized logistic distribution (GLO) and the AL linear trend model could obtain the optimal fitting; compared with the conventional frequency analysis, the design flow of 100 a obtained by the TVM model decreased with time, but the return period showed an upward trend. The upstream cascade reservoirs had an obvious regulation effect on the peak flow of 100 a flood at Chiang Saen Station especially after the operation of Nuozhadu Reservoir, which had a positive effect on the downstream flood control.

Key words: hydrological frequency analysis; non-stationary; time-varying moment model; probability distribution function; the upper reaches of Mekong River

1 研究背景

在水利水电工程设计中, 水文频率分析是设计洪水计算及确定重现期的关键^[1-2]。传统水文频率计算建立在水文时间序列一致的基础上, 近些年来, 在气候变化和人类活动的影响下许多河流的水文序列

一致性遭到破坏, 传统水文频率分析方法的适用性受到质疑^[3-5]。变化环境下非一致性水文频率分析已成为水工设计规划、洪水分析和风险管理中的关键技术环节, 也是水文科学研究中的热点问题^[6-7]。

非一致性洪水频率研究主要集中在水文序列非一致性诊断和非一致性洪水频率分析两个方面。国

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067033, 41661099)

作者简介: 龙云舒(1997-), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 研究方向为极端水文事件演变。

通讯作者: 李运刚(1983-), 男, 云南大理人, 博士, 研究员, 研究方向为水文及水资源。

内外代表性的非一致性检验方法有 Mann - Kendall、Pettitt、Spearman、Brown - Forsythe 检验和贝叶斯方法等^[7-8]。在非一致性水文频率分析方面,常用水文极值序列还原/还现的方法,如降雨径流关系法、时间序列的分解与合成法及水文模型法等^[9-10]。这类方法对水文序列进行还原/还现处理后,采用一致性假设的方法对水文序列进行频率计算,然而还原/还现方法的一致性修正成果往往存在不确定性^[6-7]。因此,基于非平稳极值序列的直接水文频率分析逐渐受到重视,如混合分布法^[11]、条件概率分布法^[12]、时变矩模型^[13]和 GAMLSS (generalized additive models for location, scale and shape) 模型^[14]等。其中,时变矩模型考虑均值和方差的趋势性,将趋势性成分嵌入到了概率分布的一、二阶矩中(时变矩),可得到设计值随时间的变化关系。时变矩模型是描述单变量水文序列非一致性的有效工具,已经被应用到许多地区^[15-17]。

澜沧江 - 湄公河流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南 6 个国家,是东南亚最重要的国际河流。在气候变化和人类活动影响尤其是大规模梯级水电开发背景下,澜沧江 - 湄公河干流径流特征已经改变,水文序列一致性遭到破坏^[8,18]。本研究以干流泰国清盛水文站为例,利用 Mann - Kendall 趋势突变检测方法对年最大日流量序列进行非一致性分析,基于时变矩模型选择 6 种概率分布和 7 种趋势模型进行组合,产生 42 种竞争模型进行比较择优,分析变化环境下洪水设计值的响应规律,以期为流域水工规划、防洪安全和跨境水资源利用管理等提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况及数据来源

澜沧江 - 湄公河河长 4 880 km,流域面积为 $81 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均径流量为 $4 750 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 1)。流域主要受东南季风和西南季风的影响,降水量丰富但季节分配不均,有着较为明显的干湿季。2008 年全流域水库有效库容($86 \times 10^8 \text{ m}^3$)仅占多年平均径流量的 2%,而预计到 2025 年水库有效库容将增加到 $868 \times 10^8 \text{ m}^3$,达到多年平均径流量的 19%^[19]。截止目前中国境内澜沧江干流已建成 11 个梯级大坝,总库容约 $444.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。位于泰国境内的清盛水文站是湄公河干流上离中国最近的水文站,控制面积为 $18.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均流量为 $2 653 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

本研究中采用的清盛站 1960 - 2019 年逐日流量数据来源于湄公河委员会(<https://www.mrcmekong.org/>)。

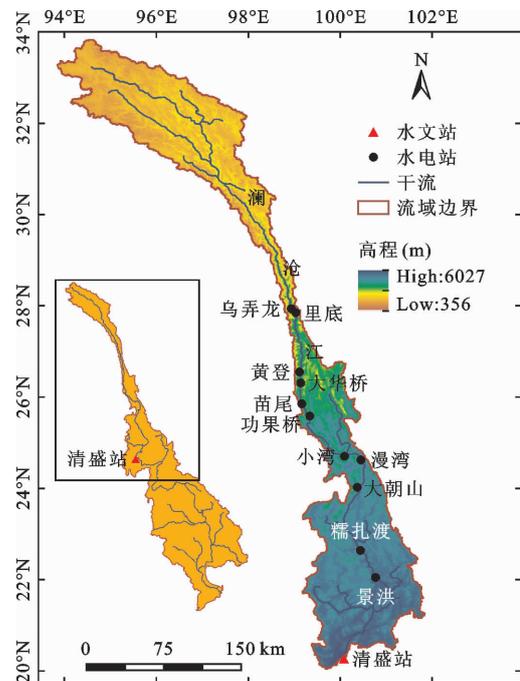


图 1 澜沧江 - 湄公河上游流域水系及已建水电站分布

表 1 澜沧江干流已建梯级电站情况

电站名称	正常蓄水位/m	库容/ 10^8 m^3	建设年份	投产年份
乌弄龙	1906	2.72	2014	2019
里底	1818	0.75	2009	2018
黄登	1619	14.18	2009	2018
大华桥	1477	2.93	2010	2018
苗尾	1408	6.60	2009	2017
功果桥	1319	5.10	2009	2011
小湾	1240	153.00	2002	2009
漫湾	994	9.20	1986	1993
大朝山	899	9.40	1997	2001
糯扎渡	807	227.00	2004	2012
景洪	602	14.00	2003	2008

2.2 研究方法

首先对水文序列采用 Mann - Kendall 法^[20]进行趋势分析和突变检验。若序列的一致性遭到破坏,则选择时变矩方法进行分析。时变矩方法主要分析水文频率曲线特征参数随时间变化的影响,认为水文序列的第一阶矩均值(m)和第二阶矩标准差(σ)随时间具有线性或抛物线性趋势变化特征,并引入时间 t 对水文频率曲线进行函数描述^[12]。时变

矩模型可由不同的概率分布线型和水文序列的第一、二阶矩的趋势模型相互组合得到。本研究选择 P-III 型分布(P-III)、广义极值分布(GEV)、广义逻辑斯谛分布(GLO)、正态分布(NORM)、二参数对数正态分布(LN2)和耿贝尔分布(GMB)共 6 种概率分布函数。为分析前两阶矩随时间的变化关系,选取合适的趋势模型嵌入到分布模型中。考虑到曲

线的外延性,采用线性(L)和抛物线性(P)趋势。将趋势嵌入频率曲线的第一、二阶矩中可得到 7 类趋势模型,具体描述参考文献[13]、[16]。采用极大似然法进行参数估计,并使用 AIC(Akaike information criterion)准则选择最优模型作为时变矩模型进行相应的频率计算。时变矩方法具体的计算流程框架如图 2 所示。

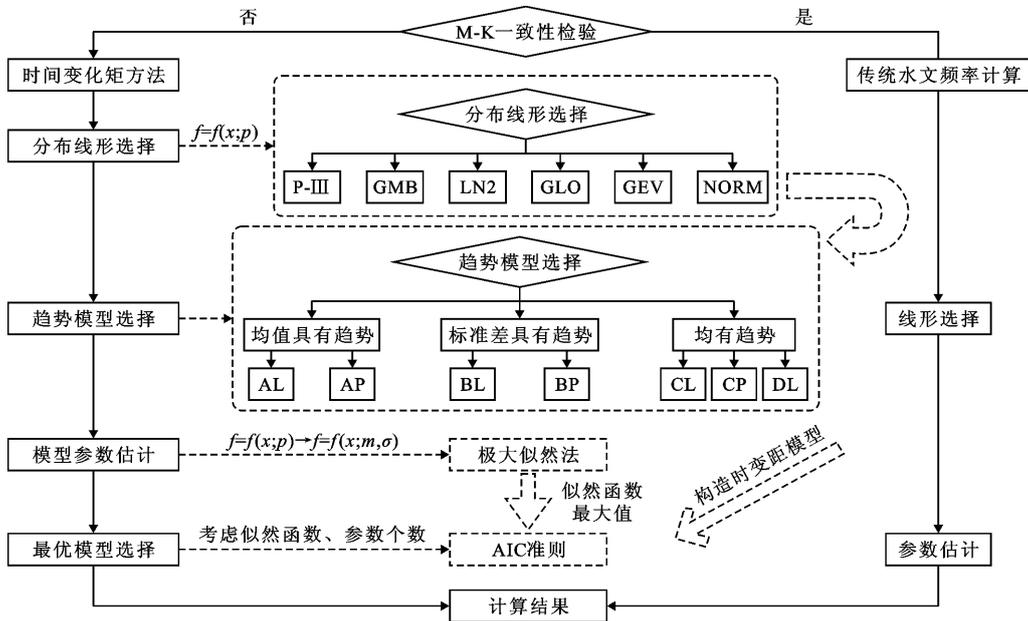


图 2 时变矩方法计算流程框架

3 结果与分析

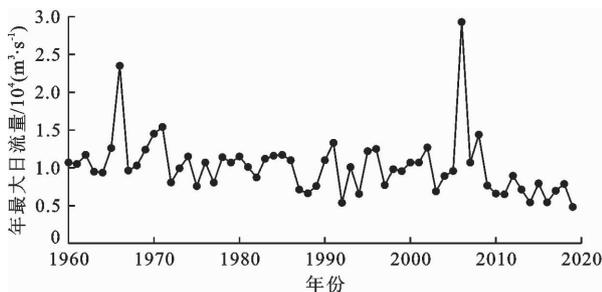
3.1 洪水系列非一致性诊断

图 3 为 1960 - 2019 年清盛水文站年最大日流量序列变化过程及 Mann - Kendall 突变检验。由图 3(a)可以看出,1960 - 2019 年年最大日流量呈“显著下降 - 平稳 - 下降”的变化过程。其中,1966 和 2006 年分别发生了洪量为 23 500 和 29 300 m³/s 的特大洪水。自 2008 年后,年最大日流量虽有波动,但均小于 10 000 m³/s。图 3(b)中趋势和突变分析结果表明,清盛水文站的年最大日流量呈显著的下

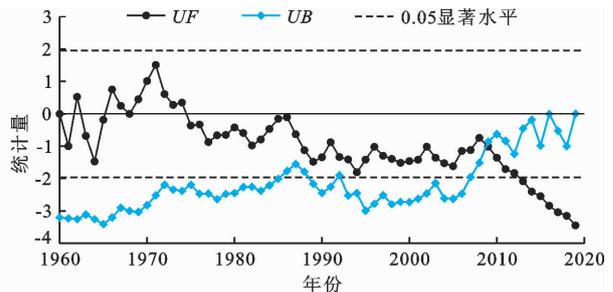
降趋势($p < 0.01$),突变点出现在 2008 年。

3.2 时变矩模型优选

基于时变矩方法,选择 6 种概率分布线型和 7 种趋势模型相互组合,共得到 42 种备选模型。采用极大似然法给出最优线型的参数估计值,并计算各种模型组合的 AIC 准则值,结果见表 2。根据 AIC 准则,选择 AIC 值最小的模型组合作为最优模型组合,则清盛水文站年最大日流量序列最优拟合分布为 GLO 分布,最优拟合趋势模型为 AL 趋势模型,时变矩最优模型为 GLO - AL 模型,即均值具有线性趋势而标准差不考虑趋势变化。



(a) 清盛站年最大日流量序列变化



(b) Mann-Kendall 突变检验

图 3 1960 - 2019 年清盛水文站年最大日流量变化及 Mann - Kendall 突变检验

表2 清盛水文站时变矩模型 AIC 拟合检验值

趋势模型	概率分布线型					
	P-III	GMB	NORM	LN2	GEV	GLO
S	1141.64	1138.60	1165.78	1139.28	1139.32	1137.57
AL	1122.33	1124.42	1163.01	1127.63	1121.54	1120.73
AP	1125.22	1126.01	1164.75	1129.75	1123.87	1122.35
BL	1130.95	1132.25	1165.48	1137.95	1130.69	1128.57
BP	1131.94	1137.64	1166.08	1136.75	1133.40	1132.36
CL	1129.51	1126.68	1166.37	1130.16	1122.90	1121.97
CP	1124.61	1127.55	1168.32	1130.80	1124.56	1122.14
DL	1122.78	1126.26	1163.12	1129.69	1123.33	1125.34

注:表中模型 S 表示统计参数的均值和方差不随时间发生变化。

3.3 水库修建不同阶段洪水线型响应规律及重现期变化

3.3.1 不同时间基点下洪水线型响应规律 结合 Mann-Kendall 法突变点检验并考虑澜沧江梯级水电工程的建设时间(表1),选择时间基准点分析水电站工程建设前后洪水线型的变化情况。澜沧江干流第1个梯级水电站漫湾水电站于1986年开工,1992年一期工程结束;第2个梯级水电站大朝山水电站于2003年完工投产,其他电站于2008年以后陆续投产运行。因此选择水库修建前的1970、1985年以及1994、2005和2019年作为时变矩模型的基准时间点。

图4为清盛水文站不同基准时间点的洪水拟合线型变化情况。在尚未进行梯级水电开发时期即1960-1970年,GLO-AL线型高水尾端位于所有线型的最上方,同一量级洪水出现的概率偏大。1971-1985年GLO-AL曲线下移,但下移的幅度不大。在梯级水电站建成影响期,1986-1994年(漫湾水电站运行)GLO-AL曲线有所下降;1995-2005年(漫湾和大朝山水电站联合运行)GLO-AL曲线相较于1994年又有所下降;2006-2019年(11个水电站陆续运行)GLO-AL曲线位于所有时间基点线型的下方,同量级洪水发生概率最低。澜沧江中下游以小湾、糯扎渡水电站为核心的梯级水电开发对洪水线型的影响较小,但水库联合运行以后清盛站同量级洪水发生的概率降低,设计洪水量级也明显减小。这说明澜沧江水电站的建设对清盛水文站洪水具有明显的调控作用。

3.3.2 设计洪峰流量与重现期的变化过程 用传统频率分析方法计算得到清盛水文站100年一遇洪水的设计值为22881 m³/s,用时变矩模型分析该设计值下重现期的变化,如图5所示。由图5可见,与

传统频率分析下某一指定流量标准值重现期不变相比,采用时变矩模型得到的重现期随时间呈上升趋势。如1960-1965年为小于100年一遇,1966-2011年为大于100年一遇且小于200年一遇,2012年后为大于200年一遇。选取指定重现期 $T = 100$ a,采用时变矩模型分析指定重现期下设计流量的变化,如图5所示。

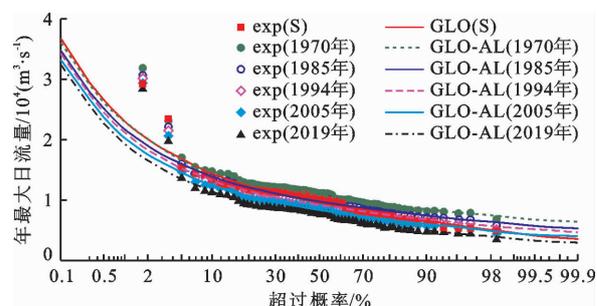


图4 清盛水文站不同基准时间点的洪水拟合线型变化

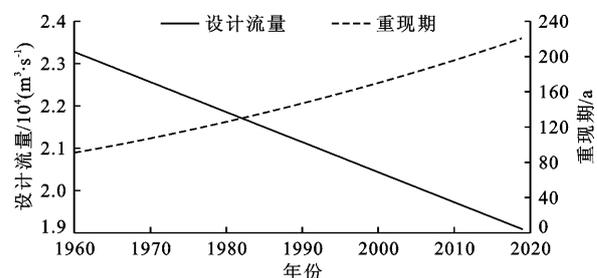


图5 清盛水文站设计流量下重现期及指定重现期下设计流量变化

由图5可见,与传统频率分析下指定重现期标准下的设计流量值不变相比,采用时变矩方法计算得到的设计流量随时间呈减小趋势。清盛水文站100年一遇洪水量级从1960年的23274 m³/s减小至2019年的19085 m³/s。如果不考虑序列非一致性处理,得到的100年一遇设计值为22881 m³/s,

该值比时变矩模型求得的2014-2019年糯扎渡水电站运行后的设计值高出18%~20%,即传统频率分析方法会高估洪水量级。从时变矩方法计算得到的设计流量来看,澜沧江-湄公河上游梯级水库尤其是糯扎渡水库运行后明显减小了清盛水文站100年一遇的洪峰流量,对下游防洪具有积极作用。

4 讨论

气候和人类活动是河川径流变化的两大主要驱动因素。基于站点观测数据分析表明,近50年来澜沧江-湄公河上游地区降水量减少趋势不明显,气温升高和潜在蒸散发增加是径流量显著减少的重要因素^[21-22]。相对于气候变化,人类活动对径流的影响在特定时期内则更为明显。研究表明,澜沧江允景洪水文站1987-2014年多年年均径流量较1980-1986年减少了6%,人类活动对径流量变化的贡献率从1987-2007年的43%增加到2008-2014年的95%,人类活动对径流量变化的影响逐渐加剧^[23]。20世纪80年代以来,澜沧江梯级水库建设导致径流年内分配呈现均匀化,下游清盛站年最大日流量呈显著的减少趋势^[24-25]。总的来说,变化环境尤其是梯级水库的建设对允景洪-万象区间径流年内分配的影响显著^[26]。

本研究结果表明,1960-2019年来清盛水文站年最大日流量序列呈现出显著减小趋势,水文极值序列突变年份(2008年)与景洪水电站蓄水、小湾水电站投产时间吻合,说明变化环境下水文极值序列发生了变异。未来湄公河上游地区极端降水量将趋于增多且降水集中程度将增大,流域洪水风险势必增加^[27]。流域内水库联合调度可以在一定程度上缓解洪水的风险^[28-29],如全流域水库联合调度可以将湄公河干流洪水从200年一遇减至20~50年一遇^[30]。在未来气候变化和人类活动加剧的背景下,使用传统频率分析方法得到的重现期和洪水设计值将会“失真”。本研究采用时变矩方法分析指定设计流量下重现期和指定重现期下设计流量,发现重现期和设计流量均随时间变化。在非一致背景下,如果采用传统水文频率分析方法而不对序列的非一致性进行考虑,将会错估洪水重现期及设计洪水量级,因此传统洪水频率计算方法的使用应该慎重。

5 结论

(1)1960-2019年清盛水文站年最大日流量序列呈显著减小的趋势并在2008年发生突变,水文极

值序列呈现非一致性。

(2)采用时变矩方法选择6种概率分布和7种趋势模型进行组合,得到42种竞争模型进行比较,结果表明清盛水文站广义逻辑斯谛分布搭配均值具有线性趋势的模型拟合最优。

(3)基于传统频率分析方法求得的100年一遇洪水设计值,在时变矩模型下重现期由水电开发前的小于100年一遇变化到2012年后的大于200年一遇;100年一遇洪水设计值也随时间呈减小趋势。

(4)湄公河上游梯级水库尤其是糯扎渡水库运行后明显减小了清盛站100年一遇的洪峰流量,对下游防洪具有积极作用。

参考文献:

- [1] KHALIQ M N, OUARDA T B M J, ONDO J C, et al. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3): 534-552.
- [2] 熊立华,江聪,杜涛,等.变化环境下非一致性水文频率分析研究综述[J]. *水资源研究*, 2015, 4(4): 310-319.
- [3] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. On critiques of “stationarity is dead: whither water management?”[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7785-7789.
- [4] CHENG Linyin, AGHAKOUCHAK A, GILLELAND E, et al. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate[J]. *Climatic Change*, 2014, 127(2): 353-369.
- [5] YANG Yuting, RODERICK M L, YANG Dawen, et al. Streamflow stationarity in a changing world[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 064096.
- [6] 梁忠民,胡义明,王军.非一致性水文频率分析的研究进展[J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 864-871.
- [7] 郭生练,刘章君,熊立华.设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 302-314.
- [8] 吴子怡,谢平,桑燕芳,等.水文序列跳跃变异点的滑动相关系数识别方法[J]. *水利学报*, 2017, 48(12): 1473-1481+1489.
- [9] 胡义明,梁忠民,姚轶,等.变化环境下水文设计值计算方法研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(4): 89-94.
- [10] 宁迈进,孙思瑞,吴子怡,等.趋势变异条件下非一致性洪水频率计算方法的择优比较分析——以洞庭湖区弥陀寺站为例[J]. *水文*, 2019, 39(6): 14-19.
- [11] WAYLEN P R, WOO M K. Prediction of annual floods generated by mixed processes[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 1283-1286.
- [12] 李新,曾杭,冯平.洪水序列变异条件下的频率分析与计算[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(6): 11-19+45.

- [13] STRUPCZEWSKI W G, SINGH V P, FELUCH W. Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum likelihood estimation [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(1): 123 – 142.
- [14] RIGBY R A, STASINOPOULOS D M. Generalized additive models for location, scale and shape[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied statistics)*, 2005, 54(3): 507 – 554.
- [15] VILLARINI G, SMITH J A, SERINALDI F, et al. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin [J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(8): 1255 – 1266.
- [16] 叶长青, 陈晓宏, 张家鸣, 等. 具有趋势变异的非一致性东江流域洪水序列频率计算研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(12): 2105 – 2116.
- [17] CHEN Xiaohong, YE Changqing, ZHANG Jiaming, et al. Selection of an optimal distribution curve for non-stationary flood series[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(1): 31.
- [18] 余涛, 谢平, 桑燕芳, 等. 基于LWHM-LUCC模型的澜沧江流域非一致性年径流频率计算与分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(12): 1085 – 1093.
- [19] HECHT J S, LACOMBE G, ARIAS M E, et al. Hydro-power dams of the Mekong River basin: A review of their hydrological impacts [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 285 – 300.
- [20] MANN H B. Nonparametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245 – 259.
- [21] 李海川, 王国庆, 郝振纯, 等. 澜沧江流域水文气象要素变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(4): 21 – 27 + 34.
- [22] LI Yungang, WANG Zhaoxia, ZHANG Yueyuan, et al. Drought variability at various timescales over Yunnan Province, China: 1961 – 2015 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1 – 2): 743 – 757.
- [23] HAN Zhongying, LONG Di, FANG Yu, et al. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 96 – 105.
- [24] 陈翔, 赵建世, 赵铜铁钢, 等. 发电调度对径流情势及生态系统的影响分析——以小湾、糯扎渡水电站为例[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(4): 36 – 43.
- [25] LI Dongnan, LONG Di, ZHAO Jianshi, et al. Observed changes in flow regimes in the Mekong River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 217 – 232.
- [26] 李杨, 王婕, 唐雄朋, 等. 变化环境下澜沧江-湄公河流域径流演变及年内分配特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 141 – 148.
- [27] 丁凯熙, 张利平, 余敦先, 等. 全球升温 1.5°C 和 2.0°C 情景下澜沧江流域极端降水的变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(4): 466 – 479.
- [28] WANG Wei, LU Hui, LEUNG L R, et al. Dam construction in Lancang – Mekong River Basin could mitigate future flood risk from warming-induced intensified rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10378 – 10386.
- [29] YUN Xiaobo, TANG Qihong, LI Jiabo, et al. Can reservoir regulation mitigate future climate change induced hydrological extremes in the Lancang – Mekong River Basin? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147322.
- [30] 侯时雨, 田富强, 陆颖, 等. 澜沧江-湄公河流域水库联合调度防洪作用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 68 – 78.

(上接第 90 页)

- [30] 郝宗睿, 李超, 任万龙, 等. 基于改进粒子群算法的喷水推进泵叶片优化设计 [J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(6): 566 – 570.
- [31] 王玉鑫, 任帅. 基于遗传-粒子群混合优化算法的拆卸序列规划方法研究 [J]. *机电工程*, 2021, 38(3): 337 – 342.
- [32] 高飞. *MATLAB 智能算法超级学习手册* [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [33] YANG Xiaohua, MEI Ying, HE Jun, et al. Comprehensive assessment for removing multiple pollutants by plants in bioretention systems [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(13): 1446 – 1453.
- [34] GUO H, LIM F Y, ZHANG Y, et al. Soil column studies on the performance evaluation of engineered soil mixes for bioretention systems [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(13): 3661 – 3667.
- [35] 任萍萍. 山地城市雨水生物滞留系统植物筛选与除氮机理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.