

专业学位
硕士学位
论文

不同土地利用情景下岩溶区水库 漫坝风险研究

吴一凡

廣西大學

二〇二二年六月

分类号 TV697.1

密级 公开

UDC

专业学位硕士学位论文
不同土地利用情景下岩溶区水库
漫坝风险研究

吴一凡

专业学位名称 工程硕士（水利工程领域）

指 导 教 师 莫崇勋 教授

张丽萍 教高

论文答辩日期 2022.05.31 学位授予日期 2022.6.23

答辩委员会主席 李勋贵 教授

不同土地利用情景下岩溶区水库漫坝风险研究

摘 要

人类在探究和改造自然的过程中使土地利用方式发生改变，作为下垫面的重要因素，土地利用/覆被变化会影响流域的水文循环过程，而具有复杂地形地貌结构的岩溶区流域对变化环境的响应尤为剧烈。本文以广西百色市澄碧河流域为对象，建立了基于岩溶区流域的 HEC-HMS 水文模型和基于蒙特卡洛随机模拟法的水库漫坝风险率计算模型。论文从风险的广义角度出发，开展土地利用/覆被变化对岩溶区流域洪水过程的影响以及对水库防洪风险度的贡献程度的定量研究，以期对岩溶区水库防洪工作和土地利用规划工作提供科学的依据。论文工作主要内容及研究成果如下：

（1）在 HEC-HMS 模型中添加了水库单元以表达岩溶结构对洪水的滞蓄作用，采用流域坝首站 2002~2018 年降雨和场次洪水进行模型的率定和验证，并以现状年（2017 年）及四种极端土地利用情景和降雨量大、小两场降雨过程驱动 HEC-HMS 模型。结果显示：改进模型模拟的总体合格率为 91.6%，平均 NSE 系数为 0.82，达到了洪水模拟和预报的乙级标准，且该模型在降雨量大且降雨集中的洪水场次中模拟效果较好，对降雨量相对较小且分散的场次洪水过程模拟较差；林地对流域的调蓄作用最强，耕地和灌丛较其他土地利用方式会减小洪水径流的下渗能力，加快洪水的汇流速度，使峰现时间提前、洪峰流量增大；小量级洪水的洪峰和洪量对土地利用变化的响应的变化平均值分别为 75.9%和 39.5%，大量级洪水的洪峰

和洪量的变化绝对值的平均值分别为 66.6%和 32.6%，小量级洪水对变化环境的响应要大于大量级洪水。

(2) 考虑入库洪水、风荷载、水位-库容关系不确定性、泄流能力不确定性联合作用对漫坝事件的影响，建立基于蒙特卡洛随机模拟法的水库漫坝风险计算模型，并采用 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法对水库运行调度过程中的水文和水力方面共四种不确定性因素进行敏感性分析。结果表明：在五种土地利用情景中，耕地主导情景下的漫坝风险率最大，为 6.25×10^{-4} ，林地主导情景下的漫坝风险率最小，为 0.6×10^{-5} ；不确定性因素的敏感性分析中敏感性排序为：入库洪水>风荷载作用>泄流能力>水位-库容关系。

(3) 从风险的广义角度出发，对水库漫坝后生命损失、经济损失、社会及环境损失进行定性和定量结合的估算，应用风险度理论对不同情景下的漫坝风险度进行计算。结果显示：水库漫坝后下游易损度为 0.897，属极高易损度；耕地主导情景下漫坝风险度为 0.67，属极高度风险；灌丛主导情景、现状年和草地主导情景下风险度分别为 0.54、0.41 和 0.39，均属高度风险；林地情景下风险度为 0.24，属中度风险。

(4) 考虑不同情境下水库漫坝风险率和漫坝损失，在未来土地利用规划中，建议限制耕地和灌丛的扩张，增加林地和草地的种植面积，以保证水库和下游的防洪安全。

关键词：HEC-HMS 模型 蒙特卡洛法 漫坝风险度 洪水响应 岩溶区流域 澄碧河水库

STUDY ON DAM OVERTOPPING RISK IN KARST AREAS UNDER DIFFERENT LAND USE SCENARIOS

ABSTRACT

Human exploration and modification of nature have led to changes in land use patterns, and as an important element of the substrate, changes in land use/cover affect the hydrological cycle processes in the catchment, and watersheds in karst areas with complex topographic landform structures responding particularly dramatically to the changing environment. In this thesis, the HEC-HMS hydrological model based on the karst zone watershed and a dam overtopping risk calculation model based on the Monte Carlo stochastic simulation method are established. From the broad perspective of risk, a quantitative study of the impact of land use/cover change on the flooding process in the karst area basin and the degree of contribution to the flood control risk of the reservoir are carried out, with a view to providing a scientific basis for the flood control work and land use planning work of the reservoir in the karst area. The main contents and research results of the work are as follows.

(1) Reservoir units were added to the HEC-HMS model to express the effect of karst structures on flood storage, and the model was rate and validated using rainfall and floods from 2002~2018 at the Bashou station of the basin, and the HEC-HMS model was driven by the status quo year (2017) and four extreme land use scenarios and two rainfall processes of large and small rainfall. The results show that the overall pass rate of the improved model simulation is 91.6%, and the average *NSE* coefficient is 0.82, which meets the B standard of flood simulation and forecasting, and the simulation effect of the model is better in the flood with heavy and concentrated rainfall, and the simulation of the flood process is poor in the flood process with relatively small and scattered rainfall. Woodland

has the strongest effect on watershed storage, and arable land and scrub can reduce the infiltration capacity of flood runoff compared to other land uses, speeding up the rate of confluence, causing earlier peak emergence and higher peak flows. The mean values of change in flood peak and flood volume to response under land use change are 75.9% and 39.5% for small magnitude floods and 66.6% and 32.6% for large magnitude floods, respectively, and the response of small magnitude floods to changing environment is greater than that of large magnitude floods.

(2) Considering the combined effects of incoming flood, wind load, reservoir capacity uncertainty and discharge capacity uncertainty on dam failure events, a reservoir overtopping risk calculation model based on Monte Carlo stochastic simulation method was established, and sensitivity analysis was carried out using Spearman's rank correlation method and Kendall's rank correlation method on a total of four hydrological and hydraulic uncertainties in the process of reservoir operation. The results show that among the five land use scenarios, the risk of dam overtopping is 6.25×10^{-4} for the arable dominated scenario and 0.6×10^{-5} for the woodland dominated scenario. The sensitivity ranking in the sensitivity analysis of uncertainty factors is: incoming flood > wind load effect > discharge capacity > water level reservoir capacity relationship.

(3) The qualitative and quantitative estimation of life loss, economic loss, social and environmental loss after reservoir dam overtopping was carried out, and the risk degree theory was used to calculate the risk degree of dam overtopping under different scenarios. The results show that the vulnerability of the downstream of the reservoir after the overtopping of the dam is 0.897, which is a very high vulnerability. The risk of dam overtopping under the cropland scenario is 0.67, which is a very high risk; the risk under the scrubland scenario, the status quo year and the grassland scenario are 0.54, 0.41 and 0.39, respectively, which are all high risks. The risk under the woodland scenario is 0.24, which is a

medium risk.

(4) Considering the risk rate and losses of dam overtopping under different scenarios, in the future land use planning, it is recommended to limit the expansion of arable land and scrub, and increase the area of forest land and grassland cultivation to ensure the safety of reservoirs and downstream flood control.

KEY WORDS: HEC-HMS model; Monte Carlo method; Flood risk; Flood response; Karst area watershed; Chengbi River Reservoir

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 土地利用变化的水文响应研究进展	3
1.2.2 溃坝风险研究进展	6
1.3 研究内容及技术路线	7
1.3.1 研究内容	7
1.3.2 技术路线	9
第二章 研究区概况和研究数据	10
2.1 研究区概况	10
2.1.1 流域基本情况	10
2.1.2 水文气象特征	11
2.1.3 地形地貌特征	11
2.1.4 工程概况	11
2.2 建模数据来源与处理	12
2.2.1 数据高程模型	12
2.2.2 土地利用类型数据	13
2.2.3 土壤分布数据	13
2.2.4 水文气象数据	14
2.3 本章小结	14
第三章 基于 HEC-HMS 模型的岩溶区洪水模拟研究	15
3.1 HEC-HMS 水文模型	15
3.1.1 产流模块	15
3.1.2 汇流模块	17

3.1.3 基流模块	17
3.1.4 河道演算	18
3.2 模型构建与率定	19
3.2.1 数字流域构建	19
3.2.2 气象模块构建	19
3.2.3 参数率定和验证	20
3.2.4 洪水模拟结果	23
3.3 不同土地利用情景下洪水响应	26
3.3.1 土地利用情景设置	27
3.3.2 洪水响应结果	29
3.4 本章小结	31
第四章 基于蒙特卡洛的水库漫坝风险率研究.....	33
4.1 蒙特卡洛随机模拟法	33
4.1.1 蒙特卡洛随机模拟法原理	33
4.1.2 漫坝风险率计算模型	34
4.2 随机数分布特征	35
4.2.1 随机数生成方法	35
4.2.2 入库洪水分布	36
4.2.3 风浪随机数分布	38
4.3 不同情景下的漫坝风险率	40
4.3.1 洪峰流量随机数	40
4.3.2 风浪作用随机数	41
4.3.3 水位库容关系随机数	43
4.3.4 泄流能力随机数	44
4.3.5 漫坝风险率分析结果	45
4.4 漫坝不确定性因素敏感性分析	46
4.5 本章小结	49
第五章 不同土地利用情景下水库漫坝风险度评价.....	51
5.1 风险度评价模型	51

5.1.1 大坝风险度概念	51
5.1.2 风险度等级划分	51
5.2 水库漫坝溃坝损失	52
5.2.1 生命损失	52
5.2.2 经济损失	54
5.2.3 社会和环境损失	54
5.3 漫坝易损度估算	56
5.3.1 综合评价模型	56
5.3.2 模型权重	56
5.3.3 归一化函数	57
5.4 漫坝风险度评价	60
5.4.1 漫坝危险度计算	60
5.4.2 不同土地利用情景下的漫坝风险度	62
5.5 本章小结	63
第六章 结论与展望.....	65
6.1 结论	65
6.2 展望	66
参考文献.....	68
致谢.....	75
攻读学位期间科研情况.....	77

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

我国筑坝历史久远，新中国成立以来国家对水利事业的重视，掀起了修建水库大坝的热潮。据《全国水利发展统计公报》^[1]，截至 2020 年，我国在建及已建成水库共 98566 座，总库容为 9306 亿 m^3 ，其中大型水库占比 0.79%，中型水库占比 4.2%，小型水库占比 95.01%。大量水库大坝的建成在防洪、发电、灌溉、供水、水产养殖等方面产生了巨大效益，推动了我国国民经济的快速发展。然而，大坝在为我国经济和社会民生做出巨大贡献的同时，由于自然条件和人为因素的影响也存在着颇多安全隐患。我国虽然在筑坝数量上位居世界首位，但因为筑坝技术水平等因素的制约，溃坝率也远远高于其他国家。据 Baecher 于 1980 年统计数据^[2]，自 1900 年来，由于非战争原因日本年平均溃坝率为 0.4×10^{-4} ，美国和世界的年平均溃坝率均为 2.0×10^{-4} 。相比起国外溃坝情况，自 1954 年以来的 47 年里，我国年平均溃坝率高达 8.761×10^{-4} ^[3]，我国的年均溃坝率约为世界平均水平的 4.38 倍。大坝溃坝作为一种低概率、高损失的事件，一旦发发生将会给国家经济、人民财产安全、社会和生态文明稳定等方面造成难以估量的威胁和损失。在我国已建 9 万多座大坝中，约九成是土石坝。造成土石坝失事的原因主要有洪水漫顶和坝体结构失稳，在世界众多溃坝事件中，由洪水漫顶造成的溃坝事件比例占 1/3^[4]。

人类兴修了大量水利防洪工程，一座座水库大坝被不断筑起，可国内外洪涝灾害却依然不断地发生，而超标准的洪水直接导致了漫坝事件，且造成的损失和灾害越来越严重，如河南省石漫滩水库和板桥水库在“75·8”特大洪水作用下发生漫坝事件，影响了河南省和安徽省共 29 个市县，受灾人口累计 1190 万，死亡人数约为 2.6 万以上，给 113.3 万 km^2 农田和耕地造成毁灭性的灾害，冲毁京广铁路交通线 102km，直接造成了上百亿元的经济损失，是世界上最大的大坝溃坝事件；美国 Edenville 大坝溃决后，溃坝洪水随即使得下游大坝漫坝和堤防连锁式溃决，造成 1.9 亿美元的经济损失和 5500 万美元的灾害应急费用^[5]。究其原因，主要是因为气候变化和人类活动双重决定性因素对水文循环过程的影响^[6]。近半个世纪，由于人类社会不断发展造成的温室效应，使全球温度不断升高，气候变化背景下的极端气候使得极端降雨事件频繁发生，是洪灾产

生的直接原因。而在人类对大自然不断探索的过程中,人类活动造成了土地利用/覆被结构的改变,主要表现在对森林植被的建造与破坏、流域水利工程兴建、水土保持和退耕还林/还草政策的实施。在长期时间尺度下,气候变化环境对水文过程的影响尤为强烈,但对短期时间尺度,土地利用变化主导着水文循环过程。作为流域下垫面的重要因素,土地利用/覆被的改变会直接影响到水文循环中植物截留量蒸发、下渗等过程,导致了洪水径流的产汇流过程发生变化,一定程度上破坏了洪水的天然时空分布规律,更增加了洪水序列的随机性。入库洪水的不确定性和随机性是大坝发生漫坝失事事件的关键因素,变化环境对洪水的时空分布特征和发生频率的影响对大坝安全造成了一定威胁。

我国是全球岩溶区面积分布最广的国家,岩溶区面积总计为 344 万 km^2 , 约占国土面积的 27%^[7]。西南地区是我国岩溶区的集中分布区域,此处岩溶区总面积为 194.69 万 km^2 , 其中裸露的碳酸盐岩面积占比 26%。外露的岩石在长期风化及雨水侵蚀的作用下,形成了大量裂隙、落水洞,使得大量降雨形成的地表径流沿着裂缝和孔隙流入地下形成地下暗河,形成了岩溶区流域独有的地上和地下双重空间结构。岩溶区由于其具有奇特的地形地貌特征和复杂的地上地下空间结构以及岩溶部分发育和分布不均匀,其产汇流过程较非岩溶区复杂,岩溶区下垫面对土地利用变化的响应尤为剧烈。岩溶区流域内建设有大量水库,而大部分水库仍然采用传统的调度模式,没有考虑到区域地形地貌结构的复杂性,为了保证防洪安全,以保守、单一的汛限水位和调度方式进行运行调度,汛期不敢蓄水而弃水量大,造成雨洪资源的极大浪费以及限制水库兴利效益的发挥。因此开展岩溶区水库的防洪风险分析工作,能为水库提供更科学有效的管理规则,根据实际情况合理地调整水库工程的水位、库容及下泄流量,有助于充分发挥岩溶区水库的综合效益,提高流域内雨洪资源的合理利用率。

1.1.2 研究意义

我国的筑坝历史始于上世纪 50 至 60 年代,受经济、政治多方面因素的制约,筑坝技术不成熟,设计施工考虑不周,维修和管理不当,诸多大坝在后期运行中也存在着失事风险。土石坝虽然在水库和防洪方面发挥了较大的作用,但由于施工材料和坝体结构的特殊性,一旦发生漫顶溃坝失事,将会给下游受灾区人民生命财产造成巨大威胁。澄碧河水库工程兴建与特殊的历史背景,为典型的“边勘测、边设计、边施工”的三边工程,施工质量差,经多次加固后仍存在较多安全隐患。作为广西区内第二大

土石坝，澄碧河水库承担着下游百色市城区和田阳、田东县等人口密集的重要城镇、重要事业单位、部门和国家重要交通运输通道的防洪安全保障工作。然而，随着社会的不断发展和经济的不断发展，人类活动不断扩张，流域内土地利用类型发生了一定转变。在极端降雨和土地利用方式转变的联合影响下，漫坝事件主要致灾因素之一的水库入库洪水随机特性便更难掌握。

广西岩溶区面积为 9.87 万 km^2 ，占区域总面积的 41.2%，而研究区广西百色市澄碧河流域属岩溶区与非岩溶区相结合的复杂情况，浩坤和弄林以上部分为流域的岩溶区。浩坤溶洞以上部分集雨面积约为 1122 km^2 ，受到浩坤溶洞的控制，流域过流能力较小，洪水期水流无法顺畅宣泄，导致溶洞上游水位迅速上涨，若遭遇连续的大量降雨，水库壅水和退水时间长，会对防洪安全造成一定的威胁，而变化环境对岩溶区水文过程的影响则更为剧烈。

目前，土地利用/覆被变化的水文响应研究主要针对长期尺度的径流过程，研究短期尺度的洪水响应尚少，且主要集中在非岩溶地区，对岩溶地区的变化环境洪水响应和防洪风险研究则更少。因此，结合 HEC-HMS 模型适用于小流域且能很好地模拟短历史的暴雨洪水的特点，建立基于岩溶区流域的分布式水文模型，定量研究土地利用/变化对岩溶区洪水过程的影响以及对岩溶区水库防洪风险的贡献度，能为岩溶区流域未来土地利用的合理规划和岩溶流域水库的防洪风险管理提供科学有力的依据，对当地防洪减灾工作具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 土地利用变化的水文响应研究进展

对于变化环境对水文过程的影响，在较长的时间尺度，气候变化对水文过程的影响剧烈，而短期内，土地利用变化无疑是水文过程变化的主要驱动要素之一^[8]。土地利用的变化，改变了下垫面对降雨的下渗、蒸散发、截留能力，直接影响流域的产汇流过程，增大了洪涝灾害发生的频率。上世纪九十年代初，在国际地圈生物圈计划与国际全球环境变化人文因素计划联合发起了土地利用/覆被变化这一核心计划后，土地利用/覆被变化的水文效应越来越受到重视。在目前乃至未来的十几年内，土地利用变化的水文效应将成为学科研究的热点。土地利用变化的水文响应研究主要分为定性分析和定量分析两方面^[9]。国内外众多学者主要采用趋势分析法对气候和土地利用变化造成

的洪水、径流变化特征做出了定性分析^[10-13]。趋势分析是定性研究暴雨洪水特征变化的有效方法，但要体现下垫面变化对暴雨洪水特征的影响程度还需进行定量计算^[14]。

早期对土地利用变化水文响应的量化研究有流域对比实验法^[15, 16]，主要集中于研究森林变化对森林流域产流量的影响，最早可追溯到 1900 年在瑞士某森林区选取两个小流域进行的对比实验^[17]。流域对比实验法包括对比实验法，如控制流域法、单独流域法、平行流域法和多数并列流域法^[18]。这些方法以统计分析为基础，采用回归分析、方差分析等方法对观测到的水文资料进行处理分析，仅适用于较小的流域，受自然环境和降雨时空分布的影响较大，研究周期长，在同一研究周期内无法找到两个条件完全相同的流域进行对比，对于同一研究区也几乎无法从历史暴雨洪水资料中找到降雨量、降雨时空分布、前期影响雨量完全相似的降雨过程，测量结果的精度和准确性无法保证。

随着计算机科学技术的发展，各类水文模型相继问世，这为定量估算下垫面变化对水文过程的影响提供了有效又简便的手段。与对比实验法不同，水文模型模拟法适用于不同尺度和规模的流域，并能消除因降雨量及降雨时空分布差异对出口断面流量的影响。水文模型法能很好地反映流域水文现象中的物理原理，通过分析水文现象中的成因和水文要素之间的关系，以数学方法为基础建立模拟流域水文变化过程的水文模型。水文模型大致分为经验型模型、集总式水文模型和分布式水文模型。采用经验模型计算产流量的过程，无法清晰体现水文现象中的物理作用机制，因此经验模型较少被运用于土地利用变化水文响应研究。

“流域水文模型”概念约在上世纪五十年代被提出，随后相继出现了 SSARR、Stanford、新安江、TANK、HEC-1、SCS 等一系列集总式水文模型。集总式水文模型单纯地将流域看成是一个整体，没有考虑降雨时空分布和下垫面的空间差异，无法对水文过程的物理机制进行细致研究，常用于土地利用和覆被类型简单的区域。因自身的局限性，集总式水文模型不便处理下垫面变化情况下的的水文过程研究。

相比集总式水文模型，分布式水文模型按照下垫面空间分布的不均匀性，将流域划分为多个水文响应单元，能更客观地反映下垫面变化对降雨-径流过程的影响。由丹麦、英国和法国科学家共同研发并改进的 SHE 模型的推出，标志着具有物理学基础的分布式水文模型的正式问世，随着 GIS、RS 和雷达等技术的快速进步，分布式水文模型逐渐成为研究热点。以 HEC-HMS、TOPMODEL、SWAT、MIKE-SHE 等为代表的分

布式水文模型, 逐渐得到国内外学者的广泛运用。

在国外, Onstad 和 Jamieson^[19]等人最先运用水文模型探究土地利用变化对径流的影响, 土地利用变化水文响应研究逐渐由传统的统计对比方法向水文模型法转变。KA Cherkauer^[20]等人运用大尺度分布式水文模型 VIC 研究美国中西部上游植被类型的转换对地表径流的影响, 结果表明大规模林地、草地向耕地转换使月尺度的蒸散发量减少了 5-10%, 总径流量增加了 10-30%。TA Nigussie^[21]采用 HEC-1 模型研究伊斯坦布尔运河项目导致的不断扩大的城市化范围对 Ayamama 流域水文过程的影响, 结果表明当城市化范围扩大到 63km² 时, 模拟的洪水过程峰高量大, 且峰现时间最短, 对当地的防洪安全威胁最大。PE Zope^[22]等人运用 HEC-HMS 模型结合 HEC-geoHMS 软件探究下垫面条件变化对城区不同重现期下洪水的影响, 结果表明低重现期的洪水受变化环境的影响更大。Dos Santos Vanessa^[23]采用 SWAT 模型研究亚马逊东部大型流域 2020-2050 年内渐进式的森林砍伐现象对流域内月径流和水量平衡的影响, 结果显示, 至 2050 年, 森林向牧场大面积转变, 使得地表径流增加 6.5%。S Azizi^[24]采用 HEC-HMS 模型对 Ekbatan 大坝区 1985 年、2000 年和 2015 年的洪水进行了模拟, 结果发现, 随着过去 30 年土地利用类型改变, 坝区水库洪峰流量大幅度增加。

国内学者虽然对分布式水文模型的研究起步较晚, 但在对国外模型的直接应用和结合我国流域实际情况的创新方面也取得了丰硕的成果。舒晓娟^[25]采用 Wetspa 模型探究流溪河流域植树造林措施的洪水过程响应, 根据研究结果认为退耕还林增大了流域的调蓄能力。史晓亮^[26]对比 1985 年和 2000 年滦河流域土地利用状况, 采用 SWAT 模型研究两个时期的流域径流量, 结果表明, 该地区林地向耕地、草地转变导致地表径流量增加了 5.1%, 同时也证明了模型在滦河流域月径流模拟中具有良好的适用性。张兰影^[27]将 SWAT 模型和情景分析法相结合, 定量分析气候和土地利用变化对于干旱半干旱地区蒸散发和地表径流等水文要素的影响, 并对该影响进行了变化特征分析。毛慧慧^[28]分析了研究区流域内水利工程和水土保持工作引起的土地利用类型转变, 并采用新安江-海河三水源水文模型定量计算土地利用变化对百年一遇设计频率下不同时段的设计洪量的影响, 结果表明, 流域百年一遇最大 3 天、最大 5 天、最大 7 天、最大 30 天的设计洪量随着土地利用方式改变在不断减小, 且统计时段越短的洪量减小幅度越大。高玉琴^[29]基于高速发展的城市化进程, 采用 HEC-HMS 水文模型计算三种未来土地利用情景对大中小规模暴雨洪水过程影响, 结果显示, 城市化的演进使暴雨洪水的洪峰

洪量呈现增加趋势,且小量级洪水对变化环境的响应较大量级洪水剧烈。包瑾^[30]为了研究城镇化对设计洪水过程的影响,采用 HEC-HMS 模型模拟了秦淮河中下游五个城镇化发展时期下不同设计频率的洪水过程,结果发现,城镇化发展会造成下垫面的不透水面积增大从而导致相同设计频率下的洪峰洪量增加,且洪量增加程度大于洪峰。由于半干旱半湿润地区产流形式复杂,张洪波^[31]认为单纯用 SWAT 模型很难反映研究区流域地下水补给强烈情况,于是构建 SWAT-MODFLOW 模型实现地表水地下水的耦合模拟,定量分析了黄土高原变绿对径流的影响。

1.2.2 溃坝风险研究进展

风险概念于 20 世纪 50 和 60 年代首先被西方一些发达国家如美国、加拿大、澳大利亚等引入大坝安全分析领域。19 世纪 70 年代,美国连续发生的大坝溃坝事件造成了大量人员伤亡和经济损失,引起了人们的广泛关注,就此推动了大坝风险评价技术的正式产生与应用。Yen^[32]考虑水文的不确定性对大坝风险的影响,以概率理论为基础,提出了基于不同设计标准和水库工程设计使用年限因素的失事风险计算方法。Wood^[33]研究了入库洪水序列的频率分布方式对堤防漫坝风险率的影响。Tung^[34]建立了将洪水视作动态和静态过程下的堤防漫坝风险模型,并在风险计算过程中考虑水力和水文两方面不确定性的影响。美国陆军工程师团^[35]采用相对风险指数提出了包含大坝漫顶因素和建筑物结构险情因素的工程风险指数计算式。加拿大电力公司 BC Hydro^[36, 37]将风险分析方法运用于大坝安全评估中,通过制定的标准对大坝安全程度进行评估,并在之后的工作中不断完善评价标准和体系。澳大利亚大坝委员会^[38, 39]颁布的《ANCOLD 风险评估指南》中提出了包含风险事件识别、风险计算、失事后果评估的大坝风险评价框架,综合考虑了大坝失事的可能性和失事后果的严重性。Kwon^[40]运用非参数估计法估算随机变量的概率密度分布,并结合拉丁超立方抽样法建立基于 MC 法的漫坝风险计算模型,认为拉丁超立方抽样法提高了蒙特卡洛模型的计算效率。Sun^[41]考虑洪水和风浪因素对漫顶失事的影响,分别建立了基于改进蒙特卡洛法和均值一次二阶矩法的漫坝风险计算模型,并采用拉丁超立方抽样法生成均匀分布随机数,结果显示,均值一次二阶矩法模型的计算结果略高于改进蒙特卡洛模型。Goodarzi^[42]将蒙特卡洛法和拉丁超立方抽样法对伊朗南部某水库调度中泄流能力、洪峰流量分位数和水库起调水位因素进行不确定性分析并进行了漫坝风险计算,结果表明,库水位上升和风速增大对漫坝风险起到了显著影响。

我国对水利工程风险的分析工作起始于上世纪八十年代,按方法类型可分为随机微分法、随机模拟法、概率法等。徐祖信^[43]考虑了泄洪过程中水文和水力方面的不确定性,提出了基于 JC 法的开敞式溢洪道泄流风险计算模型。谢崇宝^[44]采用随机模拟法建立了综合考虑调度中不确定性因素的防洪风险率模型,并讨论了防洪风险不确定性因素的频率分析方法。姜树海^[45]将随机和模糊的不确定性因素引入大坝风险分析中,建立了漫坝失事的随机模糊风险计算模型,为待建和已建大坝防洪安全评估和校核提供了有效方法。莫崇勋^[46]采用“积分-一次二阶矩法”计算考虑洪水和风浪共同作用的不同起调水位下的漫坝风险,从效益和风险角度优化了水库汛期的汛限水位,结果证明,运用该数值微分方法计算的结果比之前运用随机模拟法的计算结果更贴合工程实际情况。袁晶瑄^[47]以设计风险控制指标,运用频率分析计算水库在防洪预报调度模式下的设计风险率,结果表明,采用防洪预报调度模式并不会增加水库的防洪风险。王冰^[48]采用蒙特卡洛随机模拟法计算梯级水库不同应急调度方案下的漫坝风险率,并运用灾害风险评价模型综合评价梯级水库应急调度的风险度,结果显示,应急调度模式下水库漫坝概率小,但漫坝后损失较高。刁艳芳^[49]识别了水库防洪调度中洪水预报误差、调度滞时误差、泄流能力、水位库容关系的不确定性,采用蒙特卡洛随机模拟法计算防洪预报调度的水库风险率,验证了梯级水库群实施联合防洪预报调度的安全性。刘章君^[50]认为洪水是多变量的随机事件,采用基于 Copula 函数的 MC 随机模拟法计算不同函数类型和不同峰量相关关系下漫坝风险率的变化,结果表明, Copula 函数能很好地表达洪峰洪量之间的相关关系,且不同 Copula 函数的漫坝风险率计算结果差异较大。黄灵芝^[51]将现实中的大坝漫顶事件看成模糊系统,考虑漫坝事件中入库洪水和风浪作用的随机性和模糊性,建立基于模糊集合论的漫坝风险分析模型,结果显示,模糊风险分析方法能更好地反映漫坝事件发生的实际情况。孙乃波^[52]基于洪水空间分布的不确定性及不确定性在防洪系统中的传递特性,采用离散求和与均值-一次二阶矩法相结合的防洪风险率计算模型以计算水库下游某断面的防洪风险率,结果显示,该断面的防洪系统满足 20 年一遇的防洪标准。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

土地利用方式的变化会改变水文要素的产汇流过程,增加洪水的不确定性,而岩

溶区流域下垫面结构组成复杂，对变化环境的响应尤为剧烈，由此带来的洪水不确定性会威胁到水库自身以及水库下游的防洪安全。论文以广西百色市澄碧河流域为对象，设置极端土地利用情景，重点关注单一土地利用方式扩张对岩溶区洪水形成过程以及对流域内水库下游防洪安全的影响，主要研究内容包括以下几个方面：

（1）基于 HEC-HMS 模型的岩溶区洪水模拟研究。利用流域数字高程数据、土壤和土地利用等数据建立基于澄碧河流域的 HEC-HMS 水文模型，考虑流域下垫面的岩溶结构对洪水径流过程的影响，以 2002 年~2018 年流域共 12 场场次洪水率定和验证模型。设置极端土地利用情景，并以不同量级的暴雨过程和 5 种土地利用情况驱动水文模型，量化下垫面单一土地利用因素对大、小量级洪水过程的影响。

（2）基于蒙特卡洛的水库漫坝风险率研究。对历史洪峰资料、有效风资料、泄流能力和水位库容关系进行统计分析，建立入库洪水、风荷载、水库泄流能力、水库水位库容关系联合作用下的水库漫坝风险率计算模型，采用蒙特卡洛随机模拟法计算 5 种土地利用情景下澄碧河水库的漫坝风险率。考虑水库运行过程中水文不确定性因素和水力不确定性因素的影响，采用 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法分析各因素的随机数与经调洪演算得到的最终坝前水位的相关性，以此表征不确定性因素的敏感性。

（3）不同土地利用情境下水库漫坝风险度评价。将漫坝事件发生频率和损失后果以风险度的概念进行综合考虑，采用定量和定性计算相结合的方式估算漫坝生命损失、经济损失、社会和环境损失，以漫坝风险率和漫坝损失通过特定函数转化成漫坝危险度和易损度，综合评价不同土地利用情景下的漫坝风险度。

1.3.2 技术路线

本文首先通过建立 HEC-HMS 水文模型进行澄碧河流域在不同土地利用情景下的洪水过程模拟；其次，以入库洪水、风荷载、泄流能力、水位-库容关系作为不确定性，建立漫坝风险率计算模型；最后，通过漫坝发生的可能性和漫坝损失，计算不同情境下的漫坝风险度。本文研究技术路线主要如下：

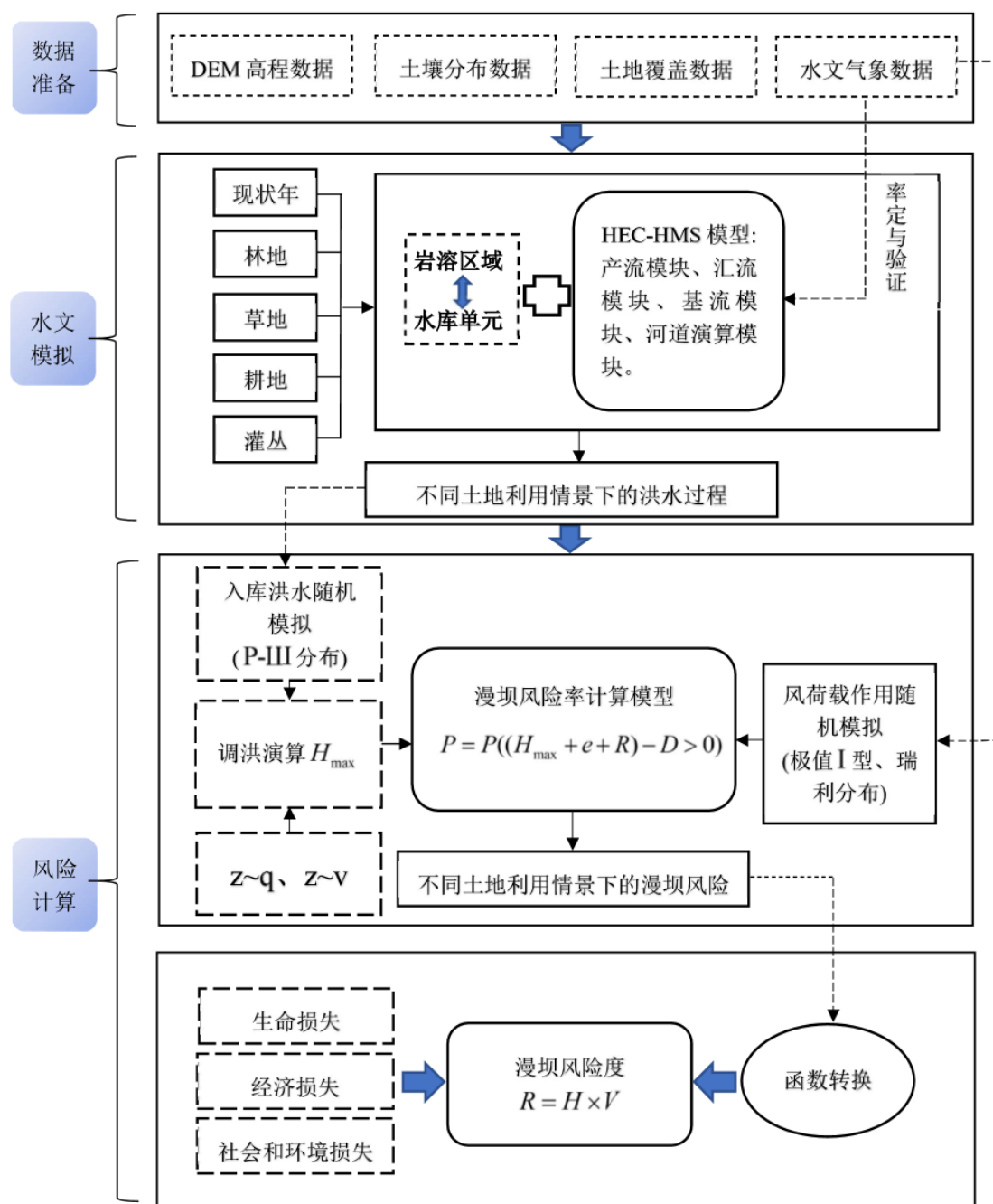


图 1-1 论文技术路线

Fig. 1-1 Technical route of the thesis

第二章 研究区概况和研究数据

2.1 研究区概况

2.1.1 流域基本情况

澄碧河流域位于广西百色市境内 ($23^{\circ} 89' N \sim 24^{\circ} 55' N$, $106^{\circ} 40' E \sim 106^{\circ} 89' E$), 系珠江水系右江段支流, 发源于广西凌云县青龙山北麓玉洪瑶族乡他以村, 途经弄桃村、下甲乡、浩坤弄林溶洞等, 最后于百色市城南处汇入右江, 总面积为 2087km^2 , 干流河长 151km 。澄碧河流域下游建有一水库, 具体地理位置为 $106^{\circ} 38' E$, $23^{\circ} 57' N$ 。澄碧河水库是一座具有发电、防洪、养鱼、供水等综合利用功能及多年调节性能的大 (I) 型水利枢纽工程。水库坝址位于广西壮族自治区百色市永乐乡南乐村那洞屯附近, 距百色市仅 7km , 坝址以上集雨面积约 2000km^2 。

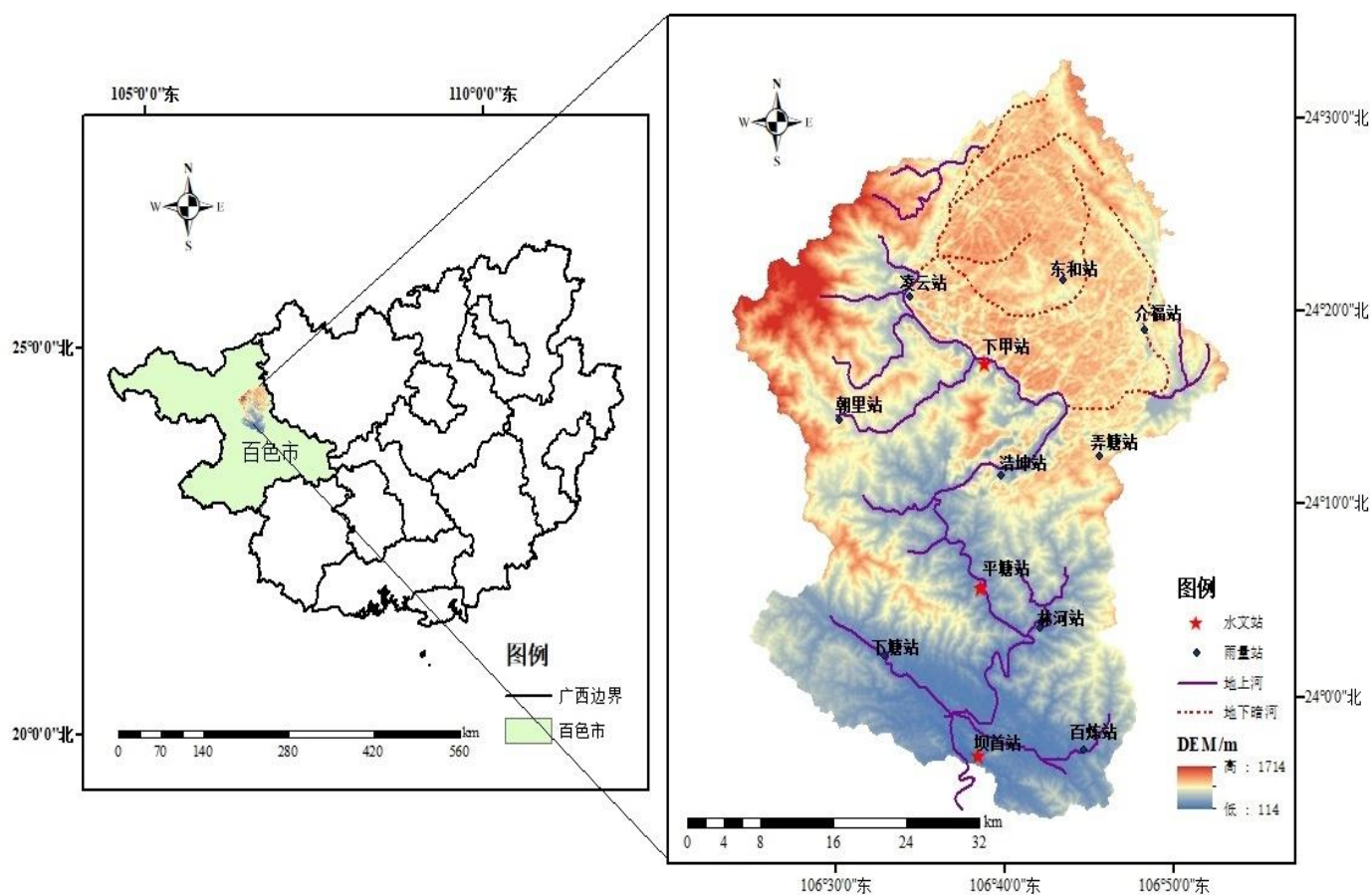


图 2-1 研究区流域示意

Fig. 2-1 Illustration of study area catchment

2.1.2 水文气象特征

受亚热带季风气候的影响，澄碧河流域气候温和且雨量充沛。流域上游为云贵高原的边界，此处山地海拔较高，而流域恰好处于迎风坡段，对南方的气流起到抬升作用，由于此地形和气候特征，上游凌云县一带频发暴雨天气，成为广西西部降雨高值区。该流域多年平均降雨量为 1560mm，降雨呈现年内分布不均的特点，汛期的降雨量约占全年的 87%左右。由于该地区暴雨是洪水发生的主要原因，故流域洪水和降雨均呈现出明显的时序规律。

2.1.3 地形地貌特征

澄碧河流域位于百色盆地边缘，为峡谷型中低山地形地貌，平均高程约为 650m，形状近似矩形，总体地势为西北高而东南低。以区域内浩坤站和弄林站两地为边界，可将澄碧河流域分为两部分，浩坤站至弄林站以上部分为我国西南地区典型的喀斯特地貌，多为伏流河和落水洞，此部分的伏流河段总长约为 25km，而弄林以下的非岩溶区部分为丘陵地貌，植被覆盖情况较好，森林密布。

2.1.4 工程概况

澄碧河水库的正常蓄水位及汛限水位均为 185m，死水位 165m，坝顶高程为 190.4m，总库容为 11.21 亿 m^3 ，兴利库容 6.0 亿 m^3 。至建成以来，水库总共经历过三次除险加固，2013 年加固后，澄碧河水库枢纽工程由大坝、溢洪道、发电放空洞、引水洞、坝后电站等建筑物组成，大坝、溢洪道、发电放空洞、引水洞等建筑物级别为 1 级，溢洪道边坡等次要永久性水工建筑物级别为 3 级。大坝为混凝土心墙与粘土心墙结合的土坝，坝顶高程 190.40m，最大坝高 70.40m，坝顶长 425.0m，坝顶宽 6.0m，大坝平面布置和剖面如图 2-2、2-3 所示；水库分别以千年一遇和万年一遇洪水作为设计和校核标准，对应的水位分别为 187.96m 和 189.29m，对应的下泄流量分别为 2940 m^3/s 和 3570 m^3/s 。为了将水库的水位维持在 185.0m，当水库来水量小于 185.0m 对应的泄流能力（1800 m^3/s ）时，控制下列流量等于来水量；当水库来水量大于 1800 m^3/s 时，则将溢洪道的四孔闸门全部敞开，一直至洪水过程退水。

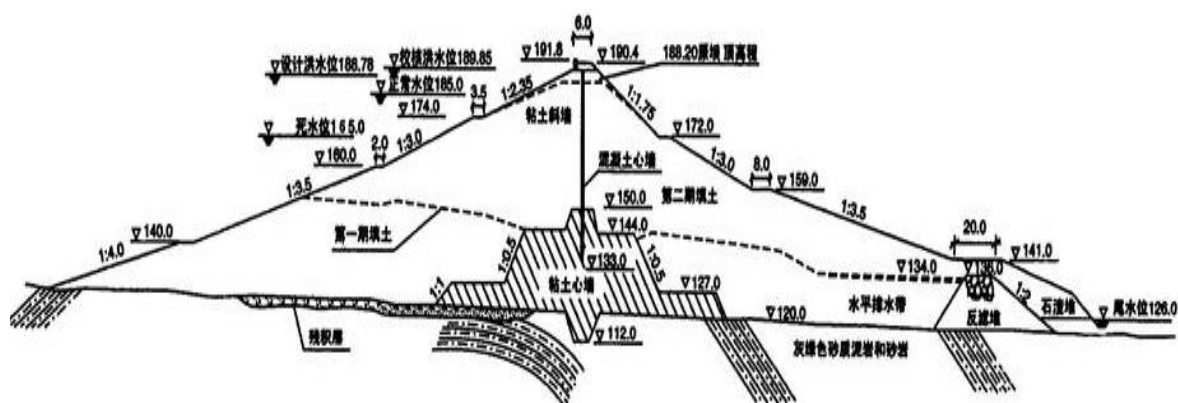


图 2-2 澄碧河水库大坝剖面

Fig. 2-2 Chengbi River Reservoir Dam Profile Structure

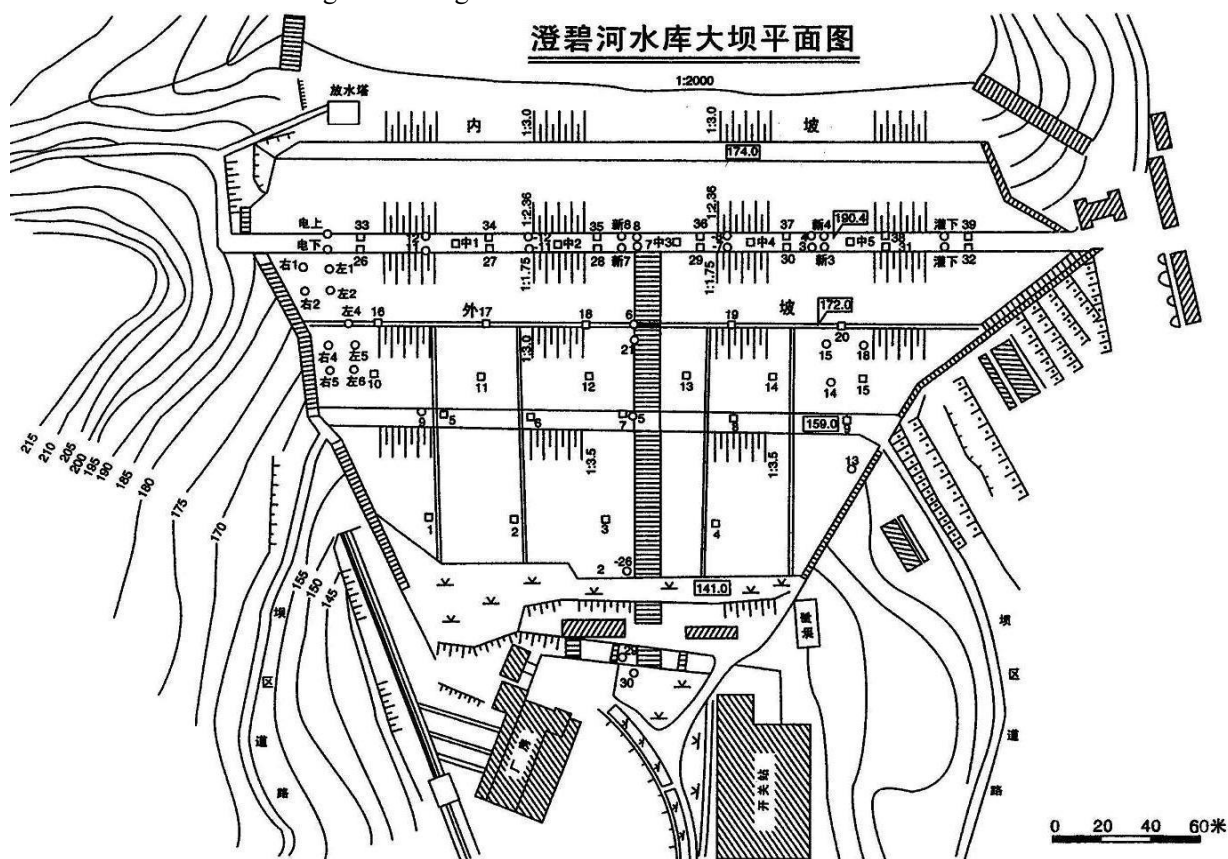


图 2-3 澄碧河水库大坝平面布置

Fig. 2-3 Chengbi River Reservoir dam plan layout

2.2 建模数据来源与处理

2.2.1 数据高程模型

数字高程模型 (Digital elevation model) 简称 DEM, 存储了地面的地形高程信息,

可反映地面的地表形态特征。在水文工作中，对研究区流域的 DEM 数据进行水文分析，可获得流域的水文特征信息，是分布式水文模型建模工作的基础。本研究 DEM 数据来源于地理空间数据云的 ASTER-GDEM2 产品的高程数据集，精度为 30m*30m。将从地理空间数据云下载到的两幅 DEM 栅格图用 GIS 软件中的“空间分析工具”进行合并，以便后续水文模型数字流域的构建。

2.2.2 土地利用类型数据

本研究中澄碧河流域的土地利用数据来源于清华大学地球系统科学研究中心（<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>）提供的全球土地覆盖产品（GLC），精度为 10m。将土地利用栅格数据及流域实际的 shape 边界文件同时加载到 GIS 软件中，运用空间分析工具中的按掩膜（澄碧河流域边界 shape 文件）提取，并根据产品提供的土地利用分类信息将澄碧河流域下垫面的土地利用情况分为耕地、林地、草地、灌丛、水体和居民用地，如图 2-2。

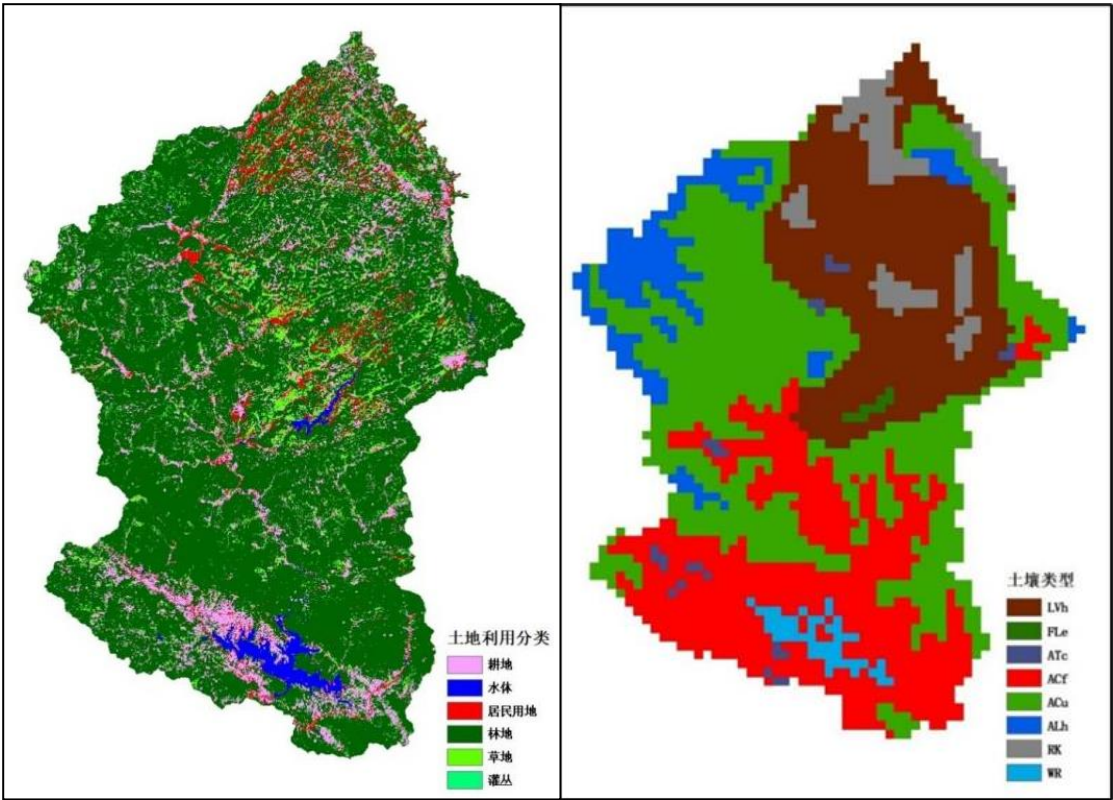


图 2-2 土地利用和土壤类型分布
Fig. 2-2 Type of land use and soil

2.2.3 土壤分布数据

土壤数据来源于联合国粮农组织（FAO）和维也纳国际应用系统研究所（IIASA）

所构建的世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.1), 数据精度为 1:100 万。将下载好的土壤数据栅格文件按流域实际边界剪裁出澄碧河流域下垫面土壤数据情况, 见图 2-2。按照世界土壤数据库的分类, 可将澄碧河流域内土壤分为 LVh、FLe、ATc、ACf、ACu、Alh、RK 及 WR 八类。

2.2.4 水文气象数据

各个流域内站点虽具有较长序列的历史资料, 但降雨和洪水数据不齐全、代表性较差。故论文中水文模型采用的水文气象数据均提取于澄碧河水库管理局建立的水务管理系统, 该系统自动连接水情自动测报系统数据库, 将数据库采集到的水文资料进行自动分析整理。系统内记录有 12 个站点 2002 年至今的不同时段及不同时间尺度 (最短为 15min) 的水文信息数据, 所测数据均按照有关规范进行测量和整编, 连续性好、质量可靠。本次研究所用到的水文数据为澄碧河流域内 12 个雨量站的 2002 年~2018 年且时间尺度为 1h 的实测降雨和径流资料, 流域内各个站点的分布图如图 2-1。

澄碧河流域内仅有三个水文站, 分别为下甲站、平塘站和浩坤站。为研究澄碧河水库的入库洪水过程, 本次研究选择将离澄碧河水库最近的坝首站作为数字流域的出流点, 坝首站上游流域面积约为 2000km²。由于坝首水文站没有流量资料, 入库洪水流量是通过水库的水文特性曲线和水量平衡方程计算得到的。而水位计在测量水库水位时敏感度较强, 数据变化幅度较大, 导致部分入库洪水的流量过程呈现了不同程度的锯齿状。虽然锯齿状仅发生在洪水过程的退水部分和尺度较小的洪水场次是合理的, 但在一定程度上也会给水文模型的模拟效果造成影响。故本文用 MATLAB 软件中平滑函数与人工修正相结合的方法, 在不改变洪水过程线形状、洪峰流量和峰现时间的情况下, 对洪水流量过程中退水部分出现的锯齿状进行了平滑修正。

2.3 本章小结

本章选择具有西南典型岩溶地貌特征的澄碧河流域为研究区, 从流域地理位置、地形地貌及水文气象特征方面详细介绍了研究流域概况, 并且简单介绍了流域内澄碧河水库的基本信息和水文特性。其次, 本章介绍了数字高程模型、土地利用和土壤数据及水文气象数据的来源及数据处理的方法, 为后续章节构建、驱动和率定水文模型提供了数据基础。

第三章 基于 HEC-HMS 模型的岩溶区洪水模拟研究

分布式水文模型 HEC-HMS 在中小流域有良好的适用性，且对短历时的洪水过程模拟效果较好。本章采用 HEC-HMS 模型结合 HEC-geoHMS 和 HEC-DSS 数据库构建了基于澄碧河流域的水文模型，以历史场次洪水进行率定和验证，并进行参数优化。考虑降雨分布和降雨强度对水文过程的影响，设置极端土地利用情景，分析单一土地利用因素对大量级和小量级洪水过程的洪峰流量、洪量及峰现时间的影响。

3.1 HEC-HMS 水文模型

HEC-HMS 模型是美国陆军工程兵团水资源机构水文工程中心开发的半分布式水文建模程序，结合 HEC-geoHMS 和 HEC-DSS，可实现流域在人工和自然状态下降雨及径流过程的连续模拟。HEC-HMS 与 DEM 相结合，根据地形地貌高程特征将流域划分为若干个子流域以及河网单元，利用不同的方法进行子流域及河网单元的产汇流计算。根据历史资料及流域实际情况，进行参数的初设和率定，计算每个子流域的产流、汇流量，经河道演算后得到流域出口断面的径流过程。

HEC-HMS 模型计算模块可分为产流模块、汇流模块、基流模块和河道演算模块，每个模块都有多种计算方法，可将不同计算方法进行组合，通过对比分析得到适用于研究区的最优组。

3.1.1 产流模块

产流计算即降雨扣除截留、下渗等损失的过程。模型共提供了七种产流计算方法，其中，盈亏常数法、SMA 模型法和 Green&Ampt 损失法计算时所需参数较多且对资料完整性要求较高，其广泛应用程度受到限制。而 SCS 单位线法和初损后损法计算原理简单、涉及到的参数较少、资料易获取，被广泛应用于缺乏资料和无资料地区^[53]。SCS 单位线中只涉及到一个无因次参数 CN 值，且其取值综合考虑流域的前期土壤湿度、土壤情况和土地利用情况^[54]，能很好地反映研究区流域下垫面特征及变化情况对降雨径流过程的影响。故论文选用 SCS 单位线法作为模型产流模块的计算。

SCS 单位线法以水量平衡方程及比例相等假设和当时可能最大潜在滞流量关系假设为原理计算流域产流量^[55]，其计算公式为

$$\frac{F}{S}=\frac{Q}{(P-I_a)}$$

(3-1)

$$I_a=0.2S$$

(3-2)

$$P=I_a+F+Q$$

(3-3)

其中， F 为后损量； S 为最大可能滞留量； I_a 为初损量； P 为降雨量； Q 为径流；以上单位均为 mm。

结合三式可得到 SCS 产流模型：

$$\begin{cases} Q=\frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & P\geq 0.2S \\ Q=0 & P<0.2S \end{cases}$$

(3-4)

由于 S 的变化幅度很大，不易取值，故引入无因次参数 CN ，建立最大滞留量与下垫面特性的关联：

$$S=\frac{25400}{CN}-254$$

(3-5)

CN 的取值与流域的土壤、土地利用情况有关，在产流计算中能很好地反映流域下垫面情况对径流的影响，可通过美国国家工程手册提供的 CN 值查算表获得。流域的前期土壤湿润程度也是影响 CN 取值的重要因素，可根据前五日降雨情况分为 $AMC(I)$ （干旱）、 $AMC(II)$ （一般）、 $AMC(III)$ （湿润）三类，分类标准如表 3-1 所示^[56]。三种前期土壤湿润程度状态下的 CN 转换公式为

$$CN(I)=\frac{4.2CN(II)}{10-0.058CN(II)}$$

(3-6)

$$CN(III)=\frac{23CN(II)}{10+0.13CN(II)}$$

(3-7)

表 3-1 前期土壤湿度 AMC 等级划分
Table 3-1 AMC Grading

AMC 等级	前五日降雨量(mm)	
	休眠季节	生长季节
AMC(I)	<12.7	<35.56
AMC(II)	12.7~27.94	35.56~53.34
AMC(III)	>27.94	>53.34

3.1.2 汇流模块

汇流是指降雨在扣除损失后的净雨向子流域出口断面汇集成地表径流的过程。模型提供的汇流计算方法分为概念性的运动波法和传统的单位线法，共6种。较为常用的流域汇流计算方法是于1983年被提出的Snyder单位线法，该方法定义了降雨历时、单位线洪峰流量滞后时间的关系：

$$t_p = 5.5t_r \quad (3-8)$$

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_p}{t_p} \quad (3-9)$$

其中， A 为流域总面积， km^2 ； t_p 为降雨中心与单位线洪峰的滞时， h ； t_r 为降雨历时， h ； U_p 单位线的洪峰流量， m^3/s ； C 为转换常数，国际制单位通常取值为2.75； C_p 为单位线洪峰系数，取值范围在0.1~1.0，可通过率定求得。

美国工程兵团水文中心根据流域的地形地貌特征，推出了 t_p 的计算公式：

$$t_p = \frac{(L^{0.8} \times ((\frac{1000}{CN} - 100) + 1)^{0.7})}{1900 \times Y^{0.5}} \quad (3-10)$$

其中， L 为主河道长度， In ； Y 为流域平均坡度， $\%$ ； CN 为产流计算中SCS单位线法的无因次参数。

3.1.3 基流模块

流域的水文过程分为降雨直接产生的径流和基流。基流是持续不断或无降雨时的径流，由暂时滞蓄在集水区的地表径流组成。模型提供了常数月变化值法、指数衰退法、线性水库法等进行基流计算。本文采用指数衰退法进行流域的基流计算。该方法将基流 Q_i 表示成随着时间 t 呈指数衰减的变量：

$$Q_i = Q_0 k^t \quad (3-11)$$

其中， Q_0 为初始基流， m^3/s ； k 为衰减系数。

模型中定义了阈值流量，当总流量在阈值流量之上时，通过公式(3-11)计算基流；而总流量在阈值流量之下时，基流可通过总流量减去直接径流得到，总体过程如图3-1。

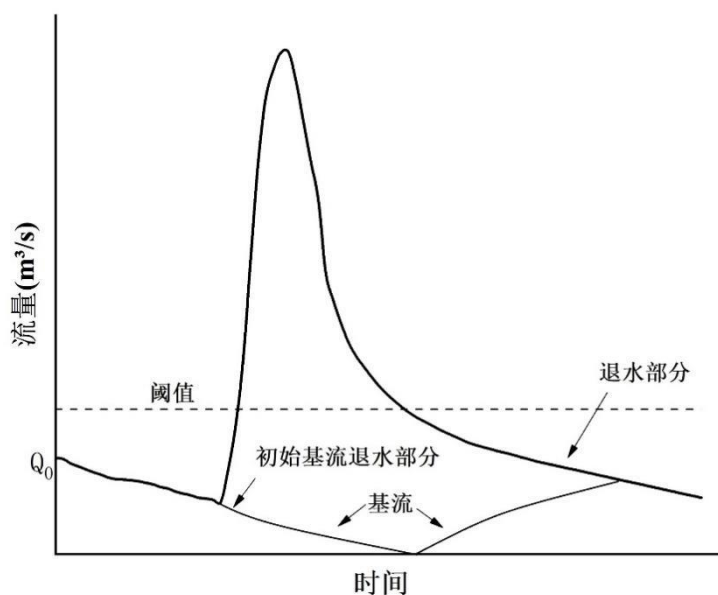


图 3-1 基流过程

Fig. 3-1 Baseflow process

3.1.4 河道演算

河道洪水演算通过以上游径流过程为边界条件推求下游径流的过程，计算方法包括洪峰延时法、马斯京根法、改进 Plus 法、马斯京根-春格法、运动波法，每种方法都基于连续方法和运动方程进行演进计算。马斯京根法所涉参数较少且易于率定，被国内外广泛运用^[57]。马斯京根法以槽蓄方程和水量平衡方程为原理，建立河道上下游入流量、蓄水量及出流量的关系，由上游入流量和河道蓄水量推算出下游出流量：

$$Q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 I_1 \quad (3-12)$$

$$\begin{cases} C_0 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{0.5\Delta t + K - Kx} \\ C_1 = \frac{0.5\Delta t + Kx}{0.5\Delta t + K - Kx} \\ C_2 = \frac{-0.5\Delta t + K - Kx}{0.5\Delta t + K - Kx} \end{cases} \quad (3-13)$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (3-14)$$

其中， K 为稳定流在河段中的传播时间； x 为流量比重因子； Δt 为时段差； C_0 、 C_1 、 C_2 均为与 K 、 x 有关的变量； Q_1 、 Q_2 分别为下游断面的入流量和出流量； I_1 、 I_2 为上游断面的入流量和出流量。 K 和 x 的数值可以根据实测流量，采用试算法进行估算。

3.2 模型构建与率定

3.2.1 数字流域构建

由于研究流域为岩溶区，存在地下暗河、落水洞等结构，高程与非岩溶区河网高程相比较低，若直接利用原始的 DEM 数据进行数字流域提取工作可能会存在子流域提取不完全的情况，影响后续模型模拟精度。多数学者采用河道烧录法对地形地貌复杂的区域进行流域划分工作，确保了流域边界提取步骤的准确性，从而提高了水文模拟工作的模拟精度^[58-61]。本文运用 HEC-geoHMS 中的 DEM reconditioning 步骤将 DEM 进行凹陷化处理，保证修正河道的高程值低于河道周围高程值，将流域右上角因岩溶区而存在的凹陷部分显化，使提取出来的流域更接近真实情况。利用 HEC-geoHMS 里的填洼、流向分析等工具对修正后的 DEM 进行水文计算、流域特性分析后，得到流域的概念模型。采用原始 DEM 提取到的流域面积为 1558km²，而经修正后的 DEM 提取到的流域面积为 2035 km²，修正后的 DEM 更贴合流域的实际情况，如图 3-2。

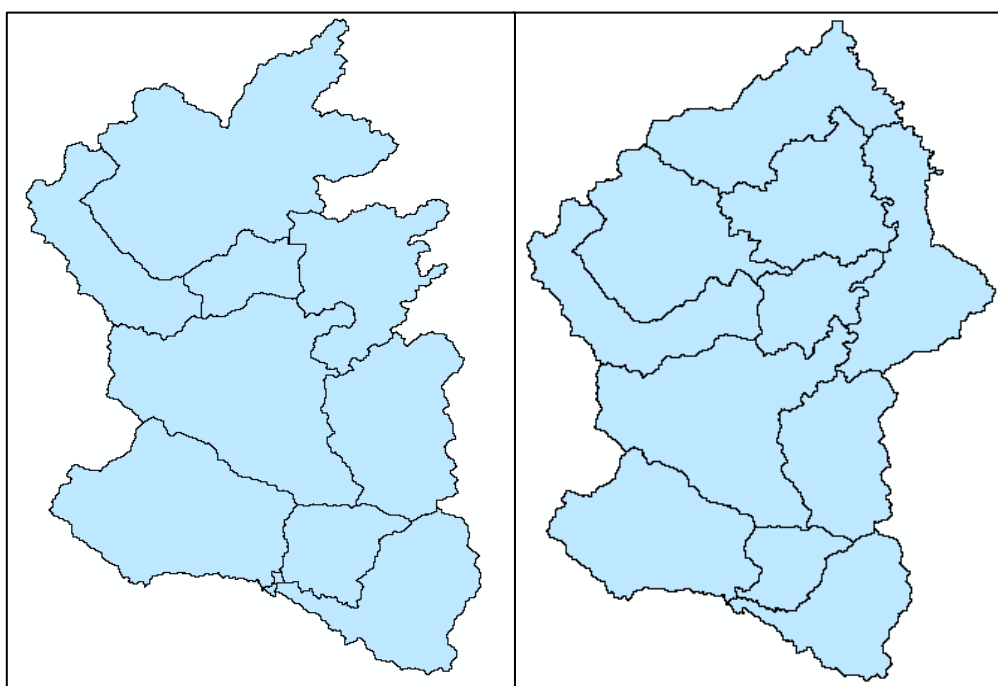


图 3-2 DEM 修正前后对比

Fig. 3-2 Before and after DEM correction

3.2.2 气象模块构建

将建立模型时需要用到的降雨、径流数据输入到 HEC-DSSVue 数据库中，并将数据设置为等步长，方便气象模块的调用。流域内共有 12 个雨量站，为了对其进行控制

面积分配，需要将雨量站的点雨量转化成子流域的面雨量，一般包括泰森多边形法、克里金插值法、反距离权重法等。本文采用 GIS 软件中提供的泰森多边形法，根据各雨量站在子流域的面积比重分配降雨量，各站点控制雨量的泰森多边形图如图 3-3 所示。

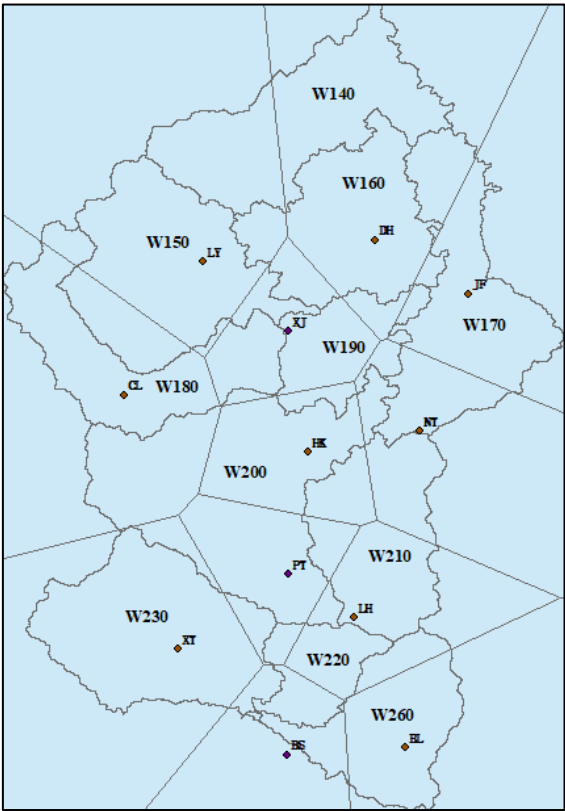


图 3-3 雨量站控制面积
(W140 等为子流域编号；PT 等为雨量站名称及泰森多边形编号)

Fig. 3-3 Rainfall station control area
(W140 et al. are sub-basin numbers; PT et al. are rainfall station names and Tyson polygon numbers)

3.2.3 参数率定和验证

(1) 模型改进

研究区流域的弄林至浩坤以上部分为岩溶区模块，此处多为落水洞、地下暗河等，对洪水起到的滞蓄作用可以概化成具有蓄水功能的水库^[62, 63]。由于地表径流会沿着裂隙向地下汇集成地下暗河，若不考虑此部分岩溶区对洪水模拟的影响，则会出现模拟的洪峰洪量与实际相比偏大现象。因此，在进行参数初值估算之前，根据流域岩溶地貌分布特征在子流域模型中添加一个水库单元，将 W140、W150、W160、W170 子流域的下游设置为添加的水库单元 Reservoir-1，即子流域 W140、W150、W160、W170 的产流量汇集于此，经水库单元的滞蓄作用后汇流至 J123，最后汇入河道 R70，具体

结构如图 3-4 所示。将水库初始的库容-泄流关系概化成线性函数，横坐标为库容（亿 m^3 ），纵坐标为泄流量（ m^3/s ），直线与 y 轴的交点为（0,110），斜率为 20，函数与 x 轴围成部分的水量受到水库的调节。

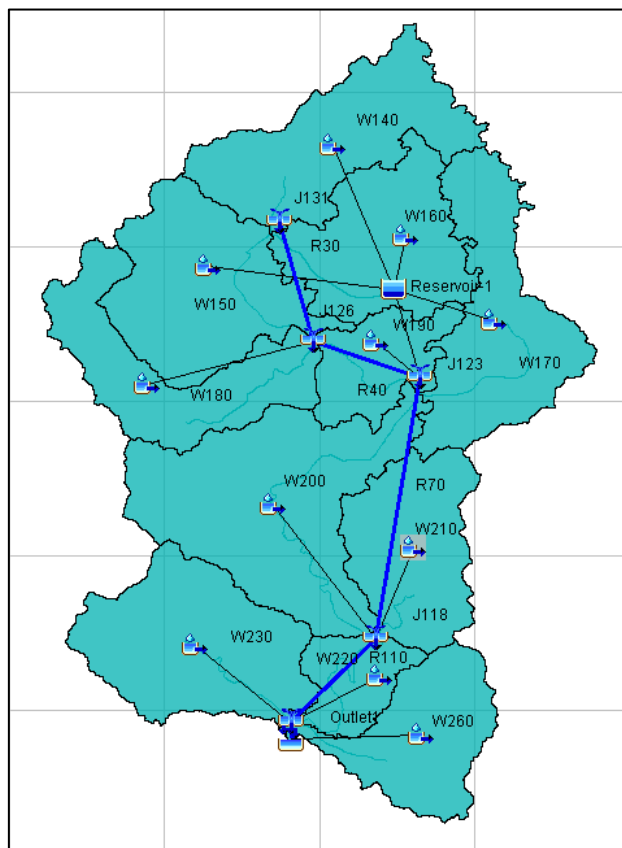


图 3-4 添加水库单元后的流域模型图

（W140 等为子流域编号，R70 等为河段；J118 等为汇流点；Reservoir-1 为水库单元；Outlet1 为流域出流点）

Fig. 3-4 Map of the catchment model after adding the reservoir unit

（W140, etc. are sub-basin numbers, R70, etc. are Reach elements; J118, etc. are Junction elements; Reservoir-1 is a reservoir unit; Outlet1 is a basin outflow point)

（2）参数初值确定

产汇流计算中的某些参数取值与流域下垫面的土地利用和土壤分布情况有关。HWSD 的土壤数据属性库中有每一种土壤数据的属性值，将土壤属性值输入 SPAW 软件计算下垫面各类土壤的饱和导水率，对土壤进行水文分组，再通过查询土壤水文分组和土地利用类型表得到 CN 值。SCS 单位线法中的 CN 值由土壤水文分组和土地利用情况决定， I_a 可由公式(3-2)和(3-5)计算得到。汇流计算中，不同前期土壤湿度等级下的流域滞时可按公式(3-10)进行计算，而洪峰系数 C_p 先假定其值为 0.3，通过后续实测

洪水数据进行率定。根据《广西暴雨径流查算手册》中各分区退水指数综合表以及实测洪水数据初步估计衰退指数法中的 r 值为 0.6， k 值为 0.2。河道演算中马斯京根法涉及到的恒定流传播时间 K 和流域比重因子 x 均可根据流域实测径流资料进行初步确定，各模块 $AMC(II)$ 状态下的参数初值确定如表 3-2 所示。

表 3-2 HEC-HMS 模型参数初值
Table 3-2 Initial values of HEC-HMS model parameters

子流域	I_a (mm)	CN 值	流域滞时 (HR)	C_p	r	k	K	x
W260	61.6	45.2	3.4	0.3	0.6	0.2		
W230	64.4	44.1	4.6	0.3	0.6	0.2		
W220	82.5	38.1	7.6	0.3	0.6	0.2		
W210	40.2	55.8	1.9	0.3	0.6	0.2		
W200	37.9	57.3	6.5	0.3	0.6	0.2		
W190	14.3	78.0	1.4	0.3	0.6	0.2		
W180	19.9	71.9	2.5	0.3	0.6	0.2		
W170	18.0	73.8	2.0	0.3	0.6	0.2		
W160	13.8	78.7	1.6	0.3	0.6	0.2		
W150	19.3	72.5	2.0	0.3	0.6	0.2		
W140	15.5	76.6	0.8	0.3	0.6	0.2		
R120							0.1	0.3
R110							0.1	0.3
R100							0.1	0.3
R70							0.1	0.3
R40							0.1	0.3
R30							0.1	0.3

(3) 参数率定

产流计算模块 SCS 曲线法涉及到的 CN 是根据研究区流域下垫面土地利用情况和土壤情况综合计算得到的，如果率定过程中改变了 CN 值则无法反映流域下垫面的真实土壤和土地利用情况。故在进行参数率定时，与产流模块 CN 值有关的参数 CN 、 I_a 以及汇流模块中 Lag 参数将不进行率定。模型自带的参数优化方法有 Nelder Mead 和单变量梯度搜索法。单变量梯度搜索法依据牛顿迭代法，在保持其他参数初值不变的情况下，每次只针对一个变量进行多次迭代和反复修正得到最优参数值，计算时间较为冗长。Nelder Mead 使用单纯形算法，依据上一步的结果自动识别合理参数估计值及剔除错误估值进行参数的寻优，过程简单、快速。本文选用 Nelder Mead 法，以率定期 2002~2011 年 8 场场次洪水为对象，进行模型的优化率定，得到 $AMC(II)$ 状态下的参数，

率定结果如表 3-3 所示。

表 3-3 参数率定结果
Table 3-3 Results of parameter rate determination

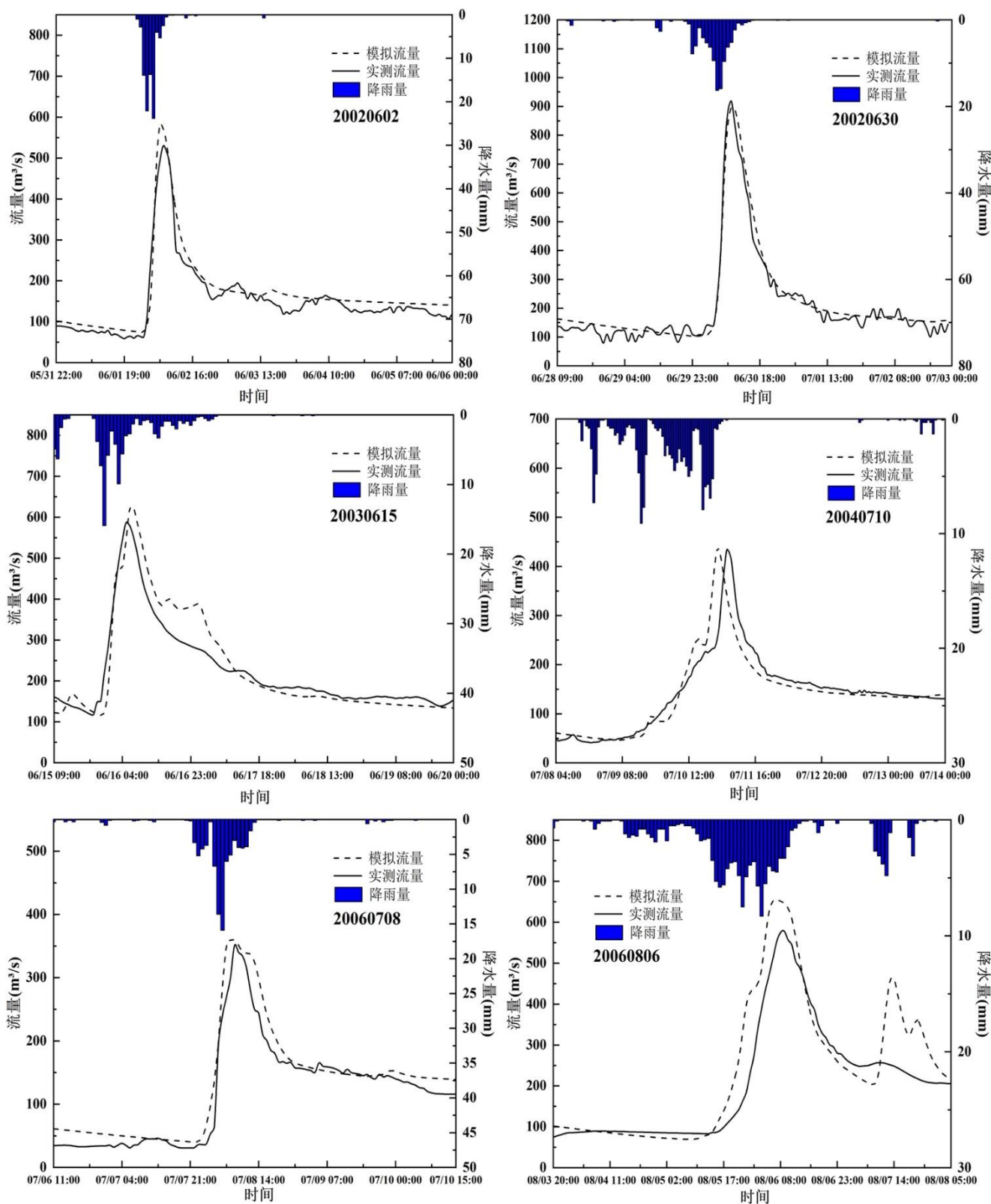
子流域	I_a (mm)	CN 值	流域滞时 (HR)	C_p	r	k	K	x
W260	61.6	45.2	3.4	0.45	0.6	0.1		
W230	64.4	44.1	4.6	0.45	0.6	0.2		
W220	82.5	38.1	7.6	0.45	0.7	0.2		
W210	40.2	55.8	1.9	0.45	0.5	0.1		
W200	37.9	57.3	6.5	0.45	0.6	0.1		
W190	14.3	78.0	1.4	0.45	0.7	0.1		
W180	19.9	71.9	2.5	0.45	0.9	0.1		
W170	18.0	73.8	2.0	0.45	0.7	0.3		
W160	13.8	78.7	1.6	0.45	0.7	0.2		
W150	19.3	72.5	2.0	0.45	0.7	0.2		
W140	15.5	76.6	0.8	0.45	0.7	0.4		
R120							0.03	0.2
R110							0.03	0.2
R100							0.03	0.2
R70							0.2	0.2
R40							0.2	0.2
R30							0.2	0.2

3.2.4 洪水模拟结果

《GBT22482-2008 水文情报预报规范》相关规定中提出了洪水预报和模拟的精度要求，其中要求模拟和实测洪峰流量误差值不超过 20%、模拟和实测径流深误差值不超过 20%，模拟和实测洪水过程的峰现时间不超过 3h，具体洪水模拟评价等级如表 3-4 所示。本文选取洪峰流量相对误差值 ΔQ 、径流深相对误差值 ΔR 、峰现时间误差值 ΔT 以及纳什效率系数 NSE 作为本次洪水模拟的精度评价指标。

表 3-4 洪水模拟结果评价等级
Table 3-4 Flood simulation results evaluation grades

精度等级	合格率	平均 NSE 系数
甲级	$\geq 85\%$	≥ 0.90
乙级	70%~85%	0.70~0.90
丙级	60%~70%	0.50~0.70



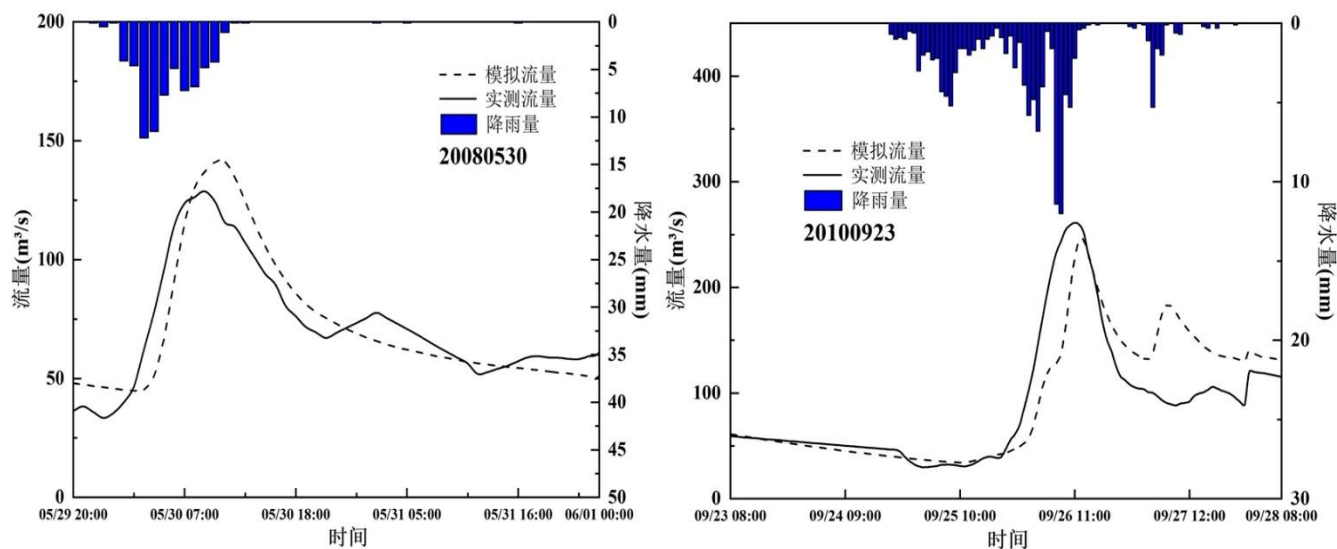


图 3-5 率定期场次洪水模拟结果

Fig. 3-5 Flood simulation results for the periodic rate

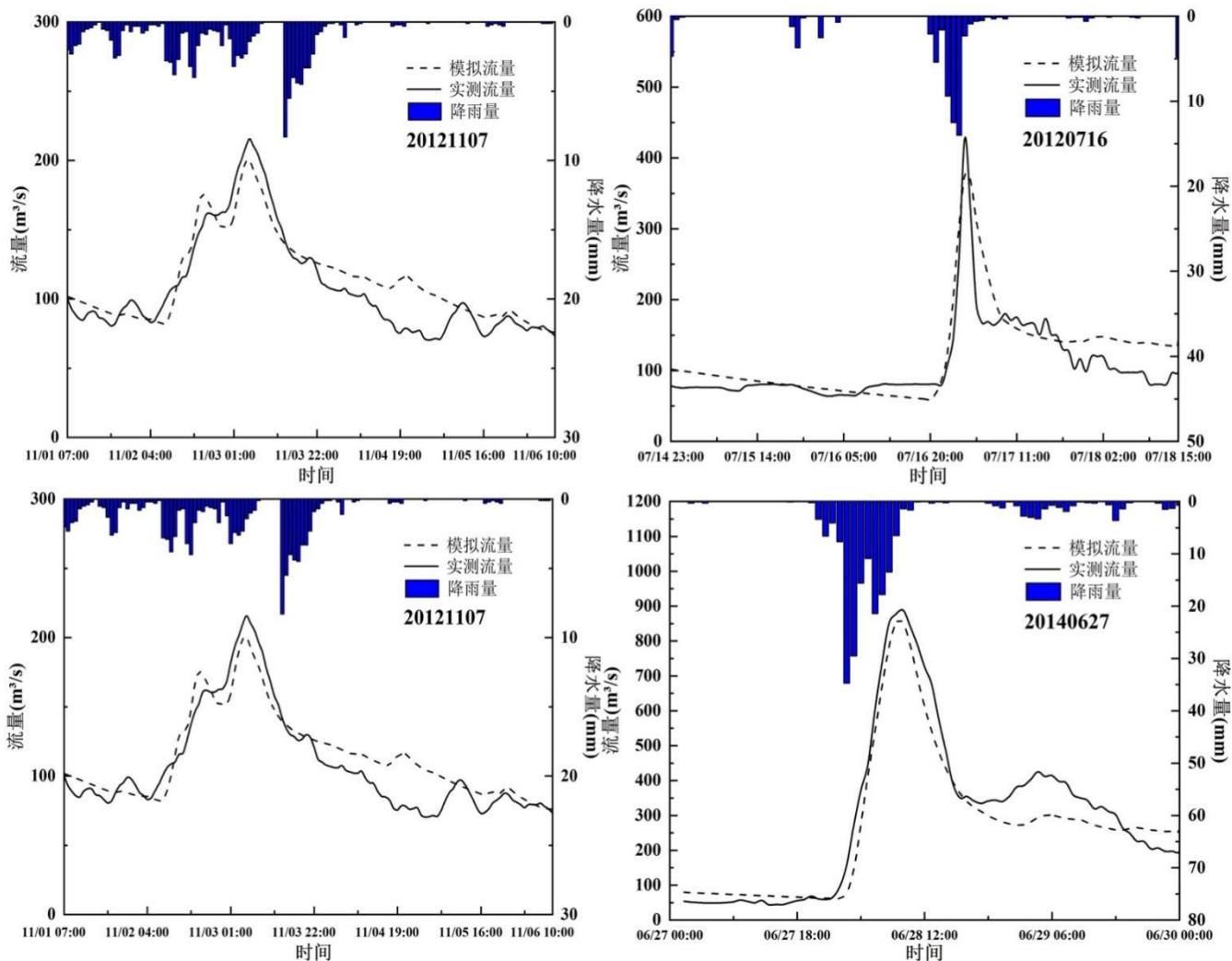


图 3-6 验证期场次洪水模拟结果

Fig. 3-6 Flood simulation results for the validation period

表 3-5 实测与模拟洪水过程对比结果

Table 3-5 Comparison results of measured and simulated flood processes

编号	洪峰流量（m³/s）			径流（mm）			峰现时间（h）			NSE	
	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差	模拟	实测	误差		
率定期	20020602	582	529	10.0%	36.3	32.7	11.1%	06:00	07:00	1	0.91
	20020630	895	918	-2.5%	42.9	40.8	5.0%	10:00	10:00	0	0.97
	20030615	626	586	6.8%	45.5	44.1	3.2%	07:00	05:00	-2	0.84
	20040710	437	433	0.8%	41.5	42.1	-1.6%	00:00	04:00	4	0.80
	20060708	360	351	2.7%	23.6	20.8	13.5%	07:00	08:00	1	0.91
	20060806	654	578	13.0%	44.6	38.5	15.8%	07:00	09:00	2	0.72
	20080530	141	129	9.7%	8.6	8.2	4.1%	11:00	09:00	-2	0.80
验证期	20100920	245	261	-6.1%	18.1	17.1	5.3%	13:00	11:00	-2	0.64
	20121024	201	216	-6.9%	24.9	23.5	5.6%	05:00	05:00	0	0.83
	20120716	376	428	-12.1%	18.9	16.7	13.2%	02:00	02:00	0	0.70
	20140627	853	888	-3.9%	33.9	37.3	-9.0%	08:00	09:00	1	0.93
	20180523	133	149	-10.6%	11.9	13.2	-10.0%	08:00	06:00	-2	0.74

图 3-5、3-6 及表 3-5 为本次洪水率定期和验证期模拟结果。从所选择的率定期场次洪水来看，洪号为 20040710 的场次洪水因峰现时间 ΔT 超过了 3h 未达到合格标准，率定期合格率为 87.5%，平均纳什效率系数为 0.83。验证期模拟洪水的合格率为 100%，平均纳什效率系数为 0.80。从率定和验证期整体来看，模拟的合格率为 91.6%，平均纳什效率系数为 0.82。根据表 3-4 的洪水模拟等级标准，用于率定和验证模型的洪水均达到了《GBT22482-2008 水文情报预报规范》划定的乙级标准。从率定期洪水的模拟合格率和平均纳什效率系数来看，率定后的参数可以模拟研究区流域的水文情况。

从模拟效果来看，率定期和验证期有四场洪水模拟的 *NSE* 达到了 0.9 以上。从洪峰量级和降水集中程度角度，编号为 20020602、20060630、20030615 及 20060708 这四场洪水的洪水量级较大、降雨较为集中，四场洪水的 *NSE* 效率系数平均值为 0.895，模拟效果较好而降雨分散且降雨量级较小的洪水（如 20040710、20060806）*NSE* 偏低。因此，本次模拟得到的模型在洪水降雨量级较大及降雨相对集中的单峰性洪水过程模拟效果较好，而降雨量级较小、降雨分布相对分散的双峰及多峰型洪水过程的模拟效果较差。

3.3 不同土地利用情景下洪水响应

流域的产汇流特点不仅与下垫面的土地利用/覆被类型有关，降雨的强度和分布特

点也会影响洪水径流形成过程，故本文选取 20020630、20180523 两场暴雨过程，研究不同土地利用情景对大、小量级洪水产生的影响。

3.3.1 土地利用情景设置

虽然气候是造成洪涝灾害的重要原因，但由于下垫面变化而造成的洪灾影响不容小觑。为了研究土地利用变化对流域水文过程的影响程度，需要运用情景设计法进行定量分析。考虑到多种约束因素，目前情景分析主要方法有：（1）参照对比法；（2）历史反演法；（3）模型预测法；（4）极端土地利用法；（5）土地利用空间配置法^[64]。流域下垫面是多种土地利用/覆被情况要素集合而成的综合系统，在这样复杂的系统下很难辨别出单个要素对整个系统的影响。为了量化单一土地利用因素对流域洪水过程的影响，论文运用极端土地利用法设置几种极端土地利用情景，排除其他要素干扰，将流域内多种土地利用类型转变为单一的一种，研究流域洪水对单一土地利用因素的响应。土地利用情景设置如图 3-7 所示，土地利用类型面积变化如表 3-6 所示。

- 情景 A：2017 年土地利用情景（现状年）；
- 情景 B：情景 A 中除水域、居民用地之外的所有土地利用类型均变为林地；
- 情景 C：情景 A 中除水域、居民用地之外的所有土地利用类型均变为草地；
- 情景 D：情景 A 中除水域、居民用地之外的所有土地利用类型均变为耕地；
- 情景 E：情景 A 中除水域、居民用地之外的所有土地利用类型均变为灌丛。

此外，本研究以 2000 年和 2017 年土地利用情况做对比，分析流域整体的各土地利用因素的变化趋势，2000 年的土地利用情况及各因素面积比例见表 3-6、图 3-8。与 2000 年土地利用情况相比，2017 年土地利用总体变化情况为林地面积比例减少了 11.19%，减少的林地面积逐渐向草地、灌丛、居民用地、耕地、水体转化。

表 3-6 土地利用类型面积比例（%）
Table 3-6 Proportion of area by land-use type(%)

土地利用类型	2000 年	现状年	林地主导	草地主导	耕地主导	灌丛主导
耕地	11.36	12.56	0	0	93.68	0
水体	1.73	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
居民	0.05	4.52	4.52	4.52	4.52	4.52
林地	85.05	73.86	93.68	0	0	0
草地	1.67	6.28	0	93.68	0	0
灌丛	0.11	0.98	0	0	0	93.68

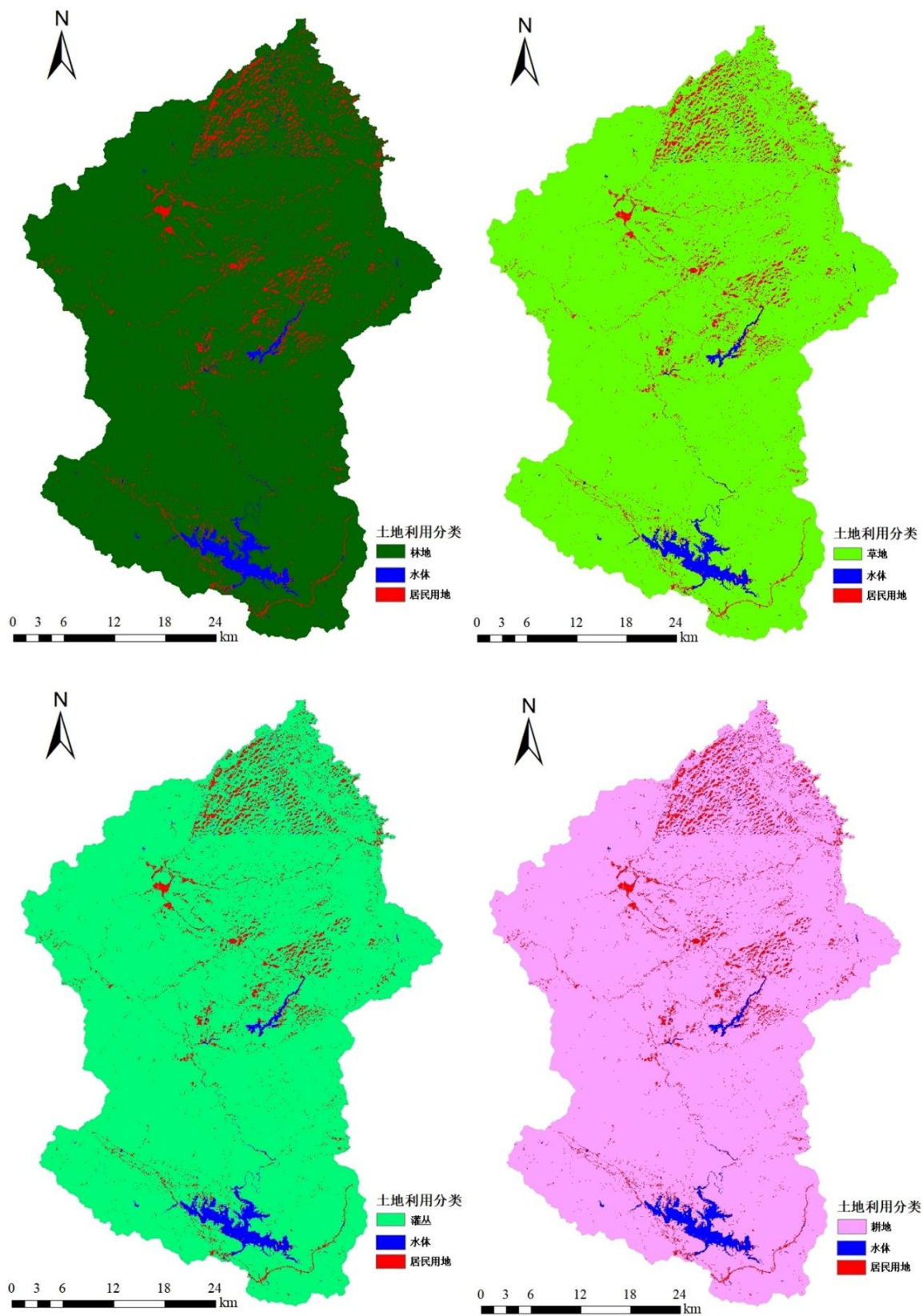


图 3-7 不同土地利用情景
Fig. 3-7 Different land use scenarios

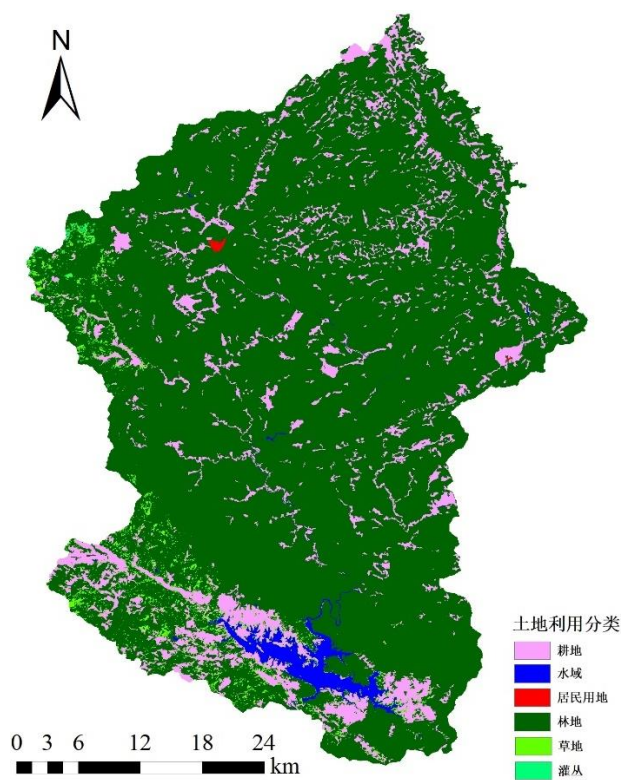
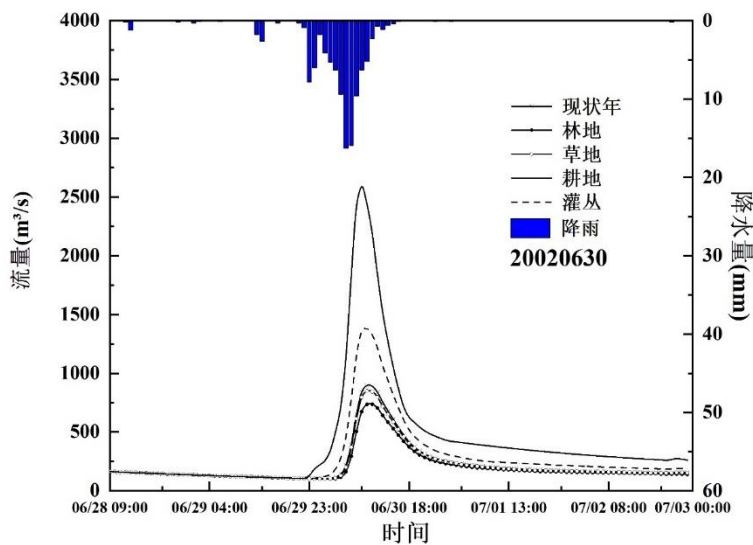


图 3-8 2002 年土地利用情况

Fig. 3-8 Land use in 2002

3.3.2 洪水响应结果

根据 CN 值查算表及相关公式,按公式(3-2)、(3-5)、(3-10)计算不同土地利用情景下 HEC-HMS 模型的 CN 值、 I_a 值和 Lag 值。将不同土地利用情景下大、小量级洪水过程进行对比,量化土地利用变化情景对洪水过程的影响,结果见图 3-9 和表 3-7。



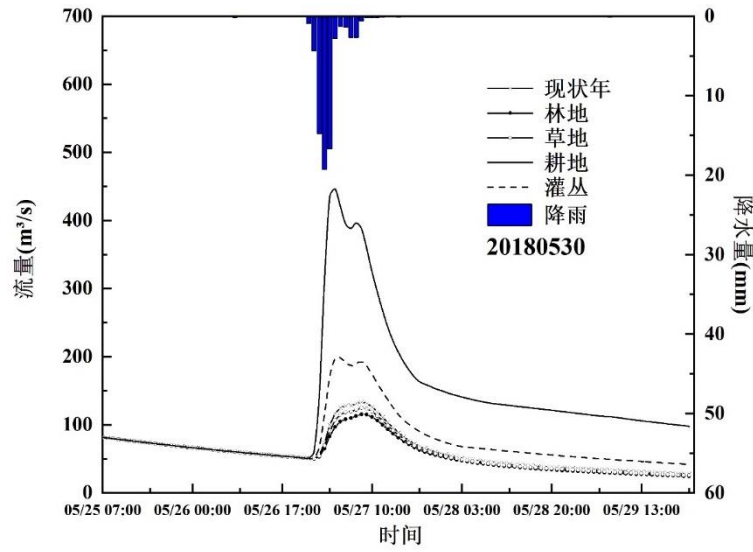


图 3-9 不同土地利用情景下场次洪水过程对比结果

Fig. 3-9 Comparative results of field flood processes under different land use scenarios

表 3-7 不同土地利用情景下洪水模拟值

Table 3-7 Flood simulation values for different land use scenarios

土地情景		洪峰流量 (m³/s)	变化量 (%)	径流量 (mm)	变化量 (%)	峰现时间
20020630	A	895	0.0	42.9	0.0	11:00
	B	736	-17.8	39.0	-9.1	11:00
	C	848	-5.2	41.8	-2.6	10:00
	D	2.58×10³	189.0	81.7	90.4	09:00
	E	1.38 ×10³	54.3	55.0	28.2	10:00
	平均		66.6		32.6	
20180523	A	133	0.0	11.9	0.0	08:00
	B	116	-13.4	11.1	-6.7	08:00
	C	149	-6.4	11.5	-3.4	08:00
	D	446	234.8	26.4	121.8	03:00
	E	199	49.1	15.0	26.1	04:00
	平均		75.9		39.5	

由图 3-8 和表 3-7 可知，在 20020630 洪水过程模拟中，与情景 A 相比林地主导情景下的洪峰流量减少了 17.8%，洪量减少了 9.1%；草地主导情景的洪峰流量减少了 5.2%，洪量减少了 2.6%；耕地主导情景下的洪峰流量增加了 189.0%，洪量增加了 90.4%；灌丛主导情景下的洪峰流量增加了 54.3%，洪量增加了 28.2%。在 20180523 洪水过程模拟中，林地主导情景下的洪峰流量比情景 A 减少了 13.4%，洪量减少 6.7%；草地主导情景的洪峰减少了 6.4%，洪量减少了 3.4%；耕地主导情景下的洪峰增加了

234.8%，洪量增加了 121.8%；灌丛主导情景的洪峰增加了 49.1%，洪量增加了 26.1%。无论大、小量级洪水，受土地利用变化因素影响最大的洪峰流量，其几种情景变化均值均在 50%以上，洪峰流量和径流量关系为：耕地>灌丛>现状年>草地>林地。

对于峰现时间，草地和林地为主导情景下的峰现时间与现状年的峰现时间基本相同，耕地主导的洪峰到达时间最早，其次是灌丛，林地、草地和现状年情景下的峰现时间基本相同；对于洪水的起涨时间及涨洪点至洪峰段，耕地的涨洪时间点最早、涨洪点至洪峰段的陡峭程度也最大，其次是灌丛，林地、草地、现状年情景下的情况基本相同。在 20180523 场暴雨作用下，洪水出现了双峰型，且耕地情景下双峰型的形状最尖锐，由灌丛、现状年、草地、林地峰形依次变圆钝，说明耕地情景对降雨的响应最敏感。从不同洪水量级来看，小量级洪水（20180523）洪峰流量和洪量的变化平均值分别为 75.9%和 39.5%，大量级洪水（20020630）洪水洪峰流量和洪量的变化平均值分别为 66.6%和 32.6%，小量级洪水的变化均值均大于大量级洪水。从涨洪时间点至洪峰段，小洪水的陡峭程度明显大于大洪水。综合以上现象，一定程度上可以表明，小量级洪水对土地利用变化的响应要大于大量级洪水。

随着耕地和灌丛类型利用面积的增大，地表逐渐光滑，汇流速度增大，地表径流的拦截率和蒸发下渗能力下降，使得耕地和灌丛主导情景下的峰现时间提前，地表的产流量变大；而林地和草地，由于植物根系较深，植物根系对土壤水的吸收能力高，枯草和落叶的存在也增加了地表的粗糙程度，增强了流域的蒸散发能力、植物截留量以及调蓄能力，而草地的枯落物能通过对降水的吸纳作用及时补给土壤水，从而减少地表径流^[65]，对流域的洪水起到了削峰减洪和降低汇流速度的作用。由此看来，林地对流域的调蓄能力最大，其次是草地和灌丛，耕地调蓄能力最弱，且对降雨的响应最敏感。因此，为了水库的防洪安全，降低流域洪涝灾害发生的频率，可采取植树造林、退耕还林、退耕还草等措施，增大流域的蒸发、下渗能力、植物截留量等，以达到延迟峰现时间、减少流域径流的目的。

3.4 本章小结

本章以澄碧河流域为研究对象，建立了 HEC-HMS 水文模型对不同土地利用情境下流域的历史大、小量级洪水过程进行模拟。根据流域的土壤、土地利用数据及实际水文、地形地貌资料估计模型各个计算模块参数的初值，再以历史场次洪水过程率定和

验证模型。总结如下：

（1）在流域岩溶区部分添加水库单元以概化岩溶结构对子流域洪水起到的滞蓄和削减作用，并以 2002-2012 年的 8 场历史场次洪水率定模型，2013~2018 年 4 场洪水验证模型，模型的模拟效果较好，总体合格率达到 91.6%，平均 NSE 效率系数为 0.82，达到水文预报规范的乙级标准，验证了该模型在澄碧河流域的良好适用性，且该模型对降雨相对集中的大量级洪水过程模拟效果优于小量级、降雨分散的洪水过程；

（2）为量化复杂下垫面中单一土地利用类型对洪水过程的影响，在现状年的基础上，设置林地主导、草地主导、耕地主导和灌丛主导四种极端土地利用情景；以五种土地利用情景和大小量级的历史降雨驱动模型，得到不同土地利用情景下流域洪水过程，并对比了几种单一土地利用对研究区流域洪峰、洪量及流域滞时方面的影响，洪峰流量和洪量排序为：耕地>灌丛>现状年>草地>林地；不同土地利用类型对流域的调蓄能力存在差异，林地对流域的调蓄能力最强，草地和灌丛次之，耕地调蓄能力最差，且耕地对降雨的敏感性最强；小量级洪水洪峰流量和洪量的变化均值均大于大量级洪水，小量级洪水过程变化的剧烈程度也大于大量级洪水，由此可知，小量级洪水对土地利用变化的响应敏感程度大于大量级洪水。

第四章 基于蒙特卡洛的水库漫坝风险率研究

水库运行调度中存在多方面不确定性因素,如水文不确定性因素和水力不确定性因素。对于水库而言,一般情况下发生漫坝事件的概率极低,但在超过一定量级的洪水以及风荷载的作用下,极有可能发生漫坝失事事件。本章水文不确定性考虑入库洪水和风荷载对坝前最高水位的影响,水力不确定性考虑水位-库容关系和水库泄流能力对水库调度的影响,对风险因素进行随机抽样,建立基于蒙特卡洛随机模拟法的漫坝风险率计算模型,计算不同土地利用情景下的水库漫坝概率。为了量化风险因素的影响程度,采用 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法分析影响因素和坝前最高水位的相关性以表达不确定性因素的敏感性。

4.1 蒙特卡洛随机模拟法

4.1.1 蒙特卡洛随机模拟法原理

蒙特卡洛随机模拟法又称统计模拟法,由美国著名数学家乌拉姆和冯·诺依曼于 20 世纪 40 年代在科学技术不断发展和电子计算机问世的背景下提出,是一种以概率统计为基本理论指导的数值计算方法,对于由于计算过程复杂繁冗而难以直接求解的问题,蒙特卡洛能有效求解,被广泛应用于各个科学分析领域。

然而有不少学者将蒙特卡洛随机模拟法运用于工程可靠度、风险度计算当中,用以解决工程中的不确定性和随机性等问题^[66,67],其基本思路如下:

(1) 首先确定 n 个随机变量,在 n 个随机变量之间建立函数关系:

$$Z = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4-1)$$

其中, X_1, X_2, \dots, X_n 为 n 个独立的、符合一定分布的随机变量;

(2) 对于已知分布函数的随机变量,可利用蒙特卡洛随机模拟法产生符合变量概率分布的随机数若干组;

(3) 将抽样产生的随机数代入到建立好的函数 $Z = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 中以计算 Z 值;

(4) 假设本次抽样组数为 N 组。在 N 组抽样中,有 M 组抽样值使 $Z > 0$ (即达到工程失效状态),则 $P = M/N$,其中, P 为工程的失效概率。

一般来说,抽样次数 N 足够大,频率越接近工程失效事件发生的概率^[68]。

4.1.2 漫坝风险率计算模型

大坝漫坝事件是指坝前最高水位超过水库大坝的最大坝高而导致水流从坝顶溢流而下的现象，其主要影响因素有洪水和风浪作用，而水库调度中的不确定性因素也会导致漫坝事件的发生。根据漫坝事件的定义和主要影响因素，考虑入库洪水和风荷载、泄流能力、水位-库容关系的坝前最高水位 Z 的计算公式为

$$Z = H_{\max} + e + R \quad (4-2)$$

其中， Z 为所有影响因素共同作用下引起的坝前最高水位，m； H_{\max} 为考虑入库洪水随机性、泄流不确定性和库容关系不确定性作用下的坝前最高静水位，m； e 为风荷载作用下引起的水面风壅高度，m； R 为风荷载作用下的引起的波浪爬高值，m。

漫坝风险率是坝前最高水位超过最大坝高的概率。根据漫坝风险率的含义，可建立计算漫坝风险率的功能函数：

$$P = P(Z > D) = P((H_{\max} + e + R) - D > 0) = \frac{L}{N} \quad (4-3)$$

其中， P 为发生漫坝事件的概率； N 为经调洪演算后得到的坝前最高水位个数； L 为功能函数值中大于等于 0 的次数，即大坝失效次数； D 为水库工程的最大坝高，m。

水库大坝发生漫坝事件是由多种因素共同作用导致的，用简单的函数难以直接求解，故本文利用蒙特卡洛随机模拟法求解水库的漫坝风险率。根据计算漫坝风险率的功能函数，利用蒙特卡洛随机模拟法计算不同土地利用情景下考虑入库洪水、风荷载、泄流能力不确定性、水位-库容关系不确定性的漫坝风险率的主要步骤简述如下：

(1) 根据五种土地利用情景下的洪峰流量的概率密度函数，利用舍选抽样法随机生成几组符合其概率密度分布的洪峰流量随机值；

(2) 根据历史调度统计资料，确定泄流随机数和库容关系随机数的分布参数，并产生大量随机数；

(3) 利用生成的洪峰流量值按同倍比放大法放大典型洪水过程，在水库原有调度规则上考虑泄流和水位-库容关系不确定性进行调洪演算，使之接近实际的调度情况，经调洪演算程序计算得到不同土地利用情景下不考虑风荷载的最大坝前水位。

(4) 根据澄碧河流域历史最大汛期有效风的风速资料计算有效风的统计参数，得到风浪随机组合值的概率密度函数，利用直接抽样法随机生成风壅高度和波浪爬高随机组合值，将其与第二步得到的不考虑风浪作用的最大坝前水位随机相加得到考虑风

浪作用的最大坝前水位；

(5) 利用建立好的漫坝风险率功能函数计算澄碧河水库不同情景下的漫坝风险率，统计考虑四种不确定性因素下最大坝前水位超过最大坝高的次数，最终得到漫坝风险率。

4.2 随机数分布特征

4.2.1 随机数生成方法

除了功能函数的建立外，相关变量随机数的产生及产生方法也是利用蒙特卡洛随机模拟法解决工程问题的关键步骤^[69, 70]，抽取随机数代表性的高低及随机数的抽取方法直接影响到了试验计算结果的精确程度^[71, 72]。为了保证抽取的随机数具有较高的代表性及提高抽样效率，引入伪随机数概念间接产生符合特定概率分布的随机数^[72]。常用的产生已知连续分布的随机数方法有直接抽样法、变换抽样法、舍选抽样法等^[73]。

(1) 伪随机数概念

蒙特卡洛随机模拟法主要依赖计算机程序生成的随机数求解问题，然而目前大多数计算机程序无法直接产生服从任意概率分布的随机数^[71]。因此，在利用计算机程序产生任意概率分布的随机数时，通常通过产生在区间内均匀连续分布的独立随机数再通过某种数值变化间接产生给定概率分布的随机数。常见的伪随机数生成算法有平方取中伪随机数生成算法、斐波那契伪随机数生成算法、小数开方伪随机数生成算法和线性同余伪随机数生成算法^[74]。其中，运用最广泛的伪随机数生成器为 Lehmer 于 1951 年首先提出的线性同余伪随机数生成器 LCG^[74]，其迭代公式为

$$x_{i+1} = (ax_i + c) \pmod{m} \quad (4-4)$$

其中， a 为乘量， c 为增量， m 为模数，且 a 、 c 取值范围均为 $[0, m]$ 。

为了控制随机数的取值范围，使第 $i+1$ 个数等于第 i 个数乘以某乘量 a 加上某增量 c ，若计算结果超过常数 m ，则有 x_{i+1} 为 $(ax_i + c)/m$ 的余数。若存在任意 i 使得 $x_{i+T} = x_i$ ，则称 T 为伪随机数生成器的周期。在一个周期内 T 个 m 模数的非负整数两两不同，则线性同余伪随机数生成器的最大可能周期为 m 。取 $r_i = x_i / m$ ，使任意周期内 T 点数据对 m 进行归一化处理，可得到 $[0,1]$ 均匀分布的随机数序列 $\{r_i\}$ ^[75]。

(2) 直接抽样法

直接抽样法又称反函数法，是最直观的产生随机数的方法^[76]。其基本方法是：利

用伪随机数生成器生成在 $[0,1]$ 区间内均匀分布的伪随机数 r_i ，将变量服从的概率分布函数 $y=f(x)$ 进行反向变换得到概率分布函数的反函数 $y=f^{-1}(x)$ ，将产生的伪随机数 r_i 代入变量服从的概率分布函数的反函数中以直接生成给定概率分布的随机数 $x_i=f^{-1}(r_i)$ 。用反函数法生成给定概率分布函数的随机数的前提是随机变量服从的概率分布函数的反函数简单且易求。

(3) 变换抽样法

变换抽样法分为一维抽样法和多维抽样^[73]，其主要原理是将符合一定概率分布的随机数通过变换方法生成不同符合不同概率分布的随机数。例如，通过以下线性变换式子，能够将在 $[a,b]$ 区间内分布的随机数转换到 $[u,v]$ 区间分布：

$$Y = \frac{X(u-v)}{(b-a)} + u \quad (4-5)$$

其中， X 为在 $[a,b]$ 区间上分布的随机数， Y 为 $[u,v]$ 区间分布的随机数。

(4) 舍选抽样法

舍选抽样法是最常用的产生随机数的方法，当随机变量概率密度函数的反函数通过计算较难求得时，可以用舍选抽样法^[77]得到给定概率分布的随机数。舍选抽样法大致步骤如下：

假设随机变量 X 的概率密度函数为 $f(x)$ 且存在一对实数 a, b ($a < b$)：

a) 假设存在 c ，使得 $f(x) \leq c$ ， $x \in (a, b)$ ；

b) 通过伪随机数发生器产生 $[0,1]$ 分布的一对伪随机数 r_1 和 r_2 ，令 $y = a + (b-a)r_1$ ，将 y 代入概率密度函数得到 $D = f(y)$ ；

c) 比较 r_2 与 D/C ，若 $r_2 \leq D/C$ ，则 $x = y$ ；否则舍去 r_1, r_2 ，返回步骤②，直到满足条件。

4.2.2 入库洪水分布

入库洪水的随机性是导致漫坝事件发生的主要风险因素。根据水文学者多年分析研究以及 SL44-2006《水利水电工程设计洪水计算规范》相关规定，我国绝大多数水文序列符合皮尔逊三型分布^[78]，其概率密度函数表达式为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (4-6)$$

其中， $\Gamma(\alpha)$ 为伽马函数， α 、 a_0 、 β 分别表示皮尔逊 III 型分布的形状、尺度和位置参数。

对于水文序列，其概率密度函数中的 α 、 a_0 、 β 与序列的统计参数有关：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{4}{C_s^2} \\ \beta = \frac{2}{EX C_v C_s} \\ a_0 = EX(1 - \frac{2C_v}{C_s}) \end{cases} \quad (4-7)$$

其中， EX 为水文序列的均值， C_v 为序列的偏态系数， C_s 为变差系数。

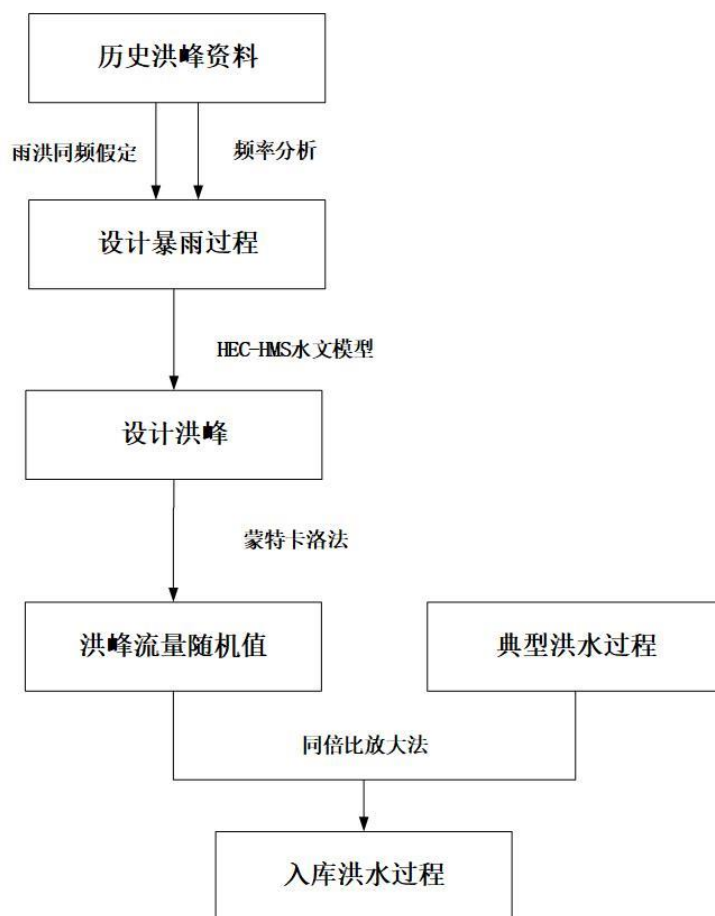


图 4-1 入库洪水随机数产生过程

Fig. 4-1 Flood random number generation process

本文采用万年一遇的校核洪水进行漫坝风险率的计算, 由于缺乏历史降雨资料, 无法运用模型直接得到不同土地利用情景下的洪峰序列。考虑到该地区暴雨是洪水产生的直接原因, 故采用暴雨和洪水同频率假定, 对实测的洪水序列进行水文频率分析, 得到每场洪峰对应的设计频率。根据《广西暴雨查算手册》查找流域内每个雨量站的设计频率下最大 1h、最大 3h 和最大 24h 设计暴雨的统计参数, 并通过降雨时程分配得到各个站点不同频率下的降雨过程。运用不同频率的降雨过程和不同土地利用情景驱动 HEC-HMS 模型, 即可得到不同情景下的最大洪峰序列。对最大洪峰序列进行水文频率分析, 采用适线法计算 5 种土地利用情景对应的水文特征参数, 并代入到概率密度函数中, 通过蒙特卡洛法生成各种情景下的洪峰流量随机数, 大致过程如下: (1) 运用伪随机数生成器生成大量[0,1]分布的伪随机数; (2) 根据概率密度函数的特征值, 即 a 、 b 、 c 值, 以此确定洪峰流量随机数的取值上下限 $[a, b]$; (3) 运用舍选抽样法生成不同情景下的洪峰流量值; (4) 采用同倍比放大法缩放水库万年一遇洪水过程, 得到随机入库洪水过程, 大致过程如图 4-1 所示。

4.2.3 风浪随机数分布

风荷载也是导致漫坝事件发生的风险因素之一。在非汛期, 水库以较低的水位进行调度, 且风荷载作用引起的水面风壅高度和波浪爬高值较小, 故因非汛期风荷载作用引起的水面升高并不会产生漫坝事件。只有在汛期, 水库因入库洪水导致库水位明显上升加上风浪作用下水面壅高才可能发生漫坝事件。发生在汛期, 且吹向坝体的风为漫坝的有效风, 只有在有效风的作用下水库发生漫坝的几率才比较大。

(1) 水面风壅高度随机分布

最大风速序列服从最大值分布, 在我国最大风速一般服从极值 I 型分布^[78]。最大风速的分布函数及概率密度函数表达式为

$$F(x) = \exp\{-\exp[-(x-u)/a]\} \quad (4-8)$$

$$f(x) = F'(x) = (1/\alpha) \exp[-(x-\mu)/\alpha] \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-\mu}{\alpha}\right]\right\} \quad (4-9)$$

其中, α 和 μ 为极值 I 型的分布参数, 可通过最大风速序列的特征参数求得:

$$\bar{W} = 0.5772\alpha + \mu \quad (4-10)$$

$$\sigma_w = 1.2525\alpha \quad (4-11)$$

其中, \bar{w} 为最大风速序列的均值; σ_w 为最大风速序列的标准差。

风荷载作用引起的水面壅高与最大风速序列服从相同的概率分布, 水面风壅高度的均值 \bar{e} 和均方差 σ_e 的一次二阶矩法计算式为

$$\bar{e} = \frac{K_t \bar{W}^2 D}{2gH_m} \quad (4-12)$$

$$\sigma_e = \frac{K_t \bar{W} \sigma_w D}{gH_m} \quad (4-13)$$

极值 I 型的概率密度的反函数较易求得:

$$F_1^{-1} = k - \frac{\ln(-\ln x)}{\alpha} \quad (4-14)$$

其中, α 、 k 为极值 I 型的分布参数, $\alpha = 1.2825/\sigma_x$, $k = \bar{X} - 0.45\sigma_x$; \bar{X} 、 σ_x 分别为符合极值 I 型概率分布序列的均值和标准差。则由伪随机数 u_i 生成极值 I 型分布的随机数 X_i 的计算公式为

$$X_i = \bar{X} - 0.45\sigma_x - 0.7797\sigma_x \ln(-\ln u_i) \quad (4-15)$$

(2) 波浪爬高随机分布

风荷载作用引起的波浪爬高服从瑞利分布, 其分布函数和概率密度函数表达式为

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\mu^2}} \quad (4-16)$$

$$f(x) = F'(x) = \left(\frac{x}{\mu^2}\right) e^{-\frac{x^2}{2\mu^2}} \quad (4-17)$$

其中, μ 为瑞利分布的分布参数, 与波浪爬高均值 \bar{R} 和标准差 σ_R 可建立如下关系:

$$\mu = \frac{\bar{R}}{\sqrt{0.5\pi}} = \frac{\sigma_R}{\sqrt{2-0.5\pi}} \quad (4-18)$$

故采用反函数抽样法直接生成水面风壅高度和波浪爬高的随机数, 利用伪随机数 u_i 产生符合极值 I 型分布随机数的反函数表达式为

$$X_i = \sqrt{-2\mu^2 \ln(1-u_i)} = 2\bar{R} \sqrt{\frac{-\ln(1-u_i)}{\pi}} \quad (4-19)$$

同一场风荷载作用下, 水面风壅高度和波浪爬高是同时生成的, 故本研究将生成

风壅高度的反函数和生成波浪爬高的反函数做线性叠加:

$$X_i = \bar{X} - 0.45\sigma_x - 0.7797\sigma_x \ln(-\ln u_i) + 2\bar{R}\sqrt{\frac{-\ln(1-u_i)}{\pi}} \quad (4-20)$$

4.3 不同情景下的漫坝风险率

水库在进行防洪调度时,存在着许多不确定性因素影响着水库的防洪安全,主要的影响因素可概括为水文、水力两方面不确定性因素^[79]。其中水文方面的不确定性因素由于造成大坝漫坝的水文因素具有随机性,主要包括水库的来水过程、起调水位、暴雨及风浪作用对洪水的影响等因素,以及水文模型不确定性和水文预报信息等不确定性因素。水力方面的不确定性因素由水力模型和工程测量方面误差产生,主要包括水位库容关系、水位泄流能力误差等。本文主要考虑入库洪水、风荷载作用因素、水位库容关系、水库泄流能力误差的不确定性。

4.3.1 洪峰流量随机数

澄碧河水库以千年一遇洪水进行设计,万年一遇洪水标准进行校核。本文以校核工况作为控制工况,采用洪峰流量随机数通过同倍比放大法缩放万年一遇的标准的洪水进行水库漫坝风险率的计算,得到澄碧河水库于校核工况下的漫坝风险率。澄碧河水库以 4h 为时段的千年一遇和万年一遇的设计洪水过程如图 4-2 所示。

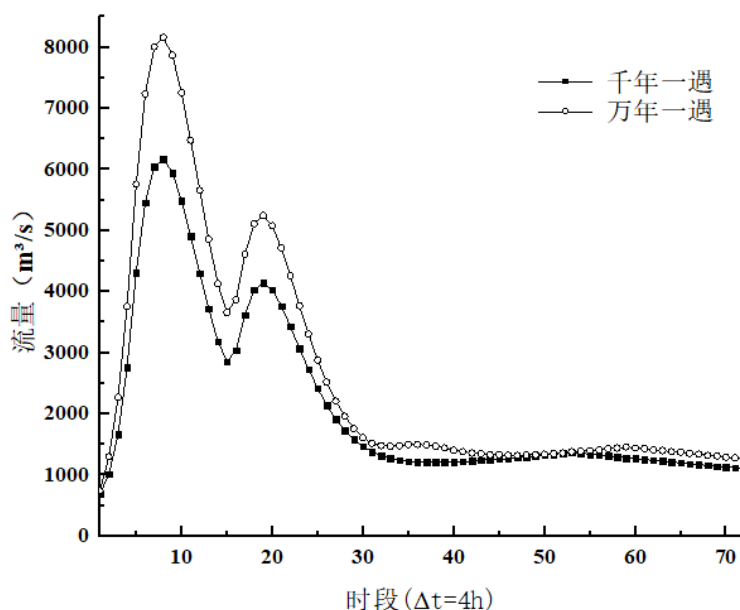


图 4-2 水库设计洪水过程

Fig. 4-2 Reservoir design flood process

对五种土地利用情景下的洪峰序列进行水文频率计算, 得到其均值、变差系数和偏态系数, 代入公式 (4-6)、(4-7) 得到不同土地利用情景下洪峰流量序列的概率密度分布函数, 采用舍选抽样法随机生成不同土地利用情景下的洪峰流量随机数。以现状年洪峰流量随机模拟为例, 简述采用蒙特卡洛法生成随机数过程, 其概率密度函数为

$$A=0.091(x-320.6)^{-0.5177} e^{-0.9 \times 10^3(x-320.6)} \quad (4-21)$$

(1) 首先伪随机数生成器生成大量[0,1]分布的伪随机数;(2) 根据洪峰流量序列的概率密度函数, 确定洪峰流量的上下限 $[a, b]$ 以及 c 值。洪峰流量随机数的上限为设计频率为万年一遇对应的洪峰流量, 对于现状年洪峰流量序列, 其万年一遇的洪峰流量为 $8155.22\text{m}^3/\text{s}$, 故 b 为 8155.22 ;(3) 由于概率密度函数 $f(x)$ 在取值范围内具有不小于0的性质^[80], 且底数不能为0, 故随机数的最小值 $a=321$, 此时随机数落在闭区间 $[321, 8155.22]$ 的概率不少于95%;(4) 概率密度函数在闭区间内呈单调递减趋势, 故 $Q=321\text{m}^3/\text{s}$ 时, $c=f(x)_{\max}=f(321)=0.0191$;(5) 采用舍选法程序即可随机生成100万各现状年情景下的洪峰流量随机数, 其他土地利用情景的洪峰随机数以此类推。

4.3.2 风浪作用随机数

(1) 水面风壅高度

根据《碾压式土石坝设计规范》中波浪和护坡计算部分, 风壅高度 e 计算表达式为

$$e = \frac{K_t W^2 D}{2gH_m} \cos \beta \quad (4-22)$$

其中, e 为水面风壅高度, m; K_t 为综合摩阻系数, 取 3.6×10^{-6} ; W 为水面上空10m处10min的平均有效风风速, m/s; D 为等效风区长度, m; H_m 为水域平均水深, m; β 为计算风向与坝轴线法线的夹角, ($^\circ$), 从安全角度考虑, 一般 β 取 0° ; g 为重力加速度, 取 9.8m/s^2 。

(2) 波浪爬高平均值

根据《碾压式土石坝设计规范》, 波浪爬高平均值的计算表达式为

$$R_p = \frac{K_\Delta K_w \sqrt{R\lambda}}{\sqrt{1+m^2}} \quad (4-23)$$

$$\begin{cases} \bar{R} = \frac{R}{1.71} \\ R = 0.0166W^{1.25}D^{0.2} \\ \bar{\lambda} = 0.389WD^{0.2} \end{cases} \quad (4-24)$$

其中, R_m 为波浪爬高平均值, m; m 为单坡的坡度系数, 取值与坡角 α 有关, $m = \cot \alpha$; K_Δ 为斜坡的糙率渗透性系数, 取值与护面类型有关; K_w 为经验系数, 可依据平均风速通过查表求得。 λ 为平均波长, m; R 、 \bar{R} 分别为波浪高度与其均值, m;

对于澄碧河水库来说, 风速仪测到的汛期东北方向和东向才是能引起漫坝事件发生的有效风。故本文在中国气象数据网上收集了百色站 1979~2018 年实测风速资料, 从风速序列中筛选出汛期, 即 4~6 月, 且方向为东向及东北向的有效风, 经过频率计算得到水库汛期有效风最大风速的均值为 $\bar{W}_{\text{有效}} = 5.04 \text{ m/s}$, 标准差为 $\sigma_{\text{有效}} = 1.46$ 。

而式 (4-12)、(4-13) 中的风速为库水面上 10m 处 10min 有效风的风速, 根据工程资料, 澄碧河水库的坝顶高程为 190.4m, 库水面上 10m 的风速即高程为 200.4m 处的有效风。百色站风速仪高程为 205m, 水库等效风区长度 $D = 800 \text{ m}$, 多年水域平均水深值为 26.8m。根据《碾压式土石坝设计规范》相关要求, 通过不同高程风速得到水面上空 10m 高度处 10min 的平均风速的计算公式为

$$W_{10} = K_Z W_Z \quad (4-25)$$

其中, W_{10} 为水面上空 10m 处 10min 的平均风速, m/s; Z 为距离水面的高度, m; K_Z 为风速修正系数, 其取值可查询表 4-1; W_Z 为距离水面上空 Z 米处的 10min 平均风速, m/s。

表 4-1 风速修正系数

Table 4-1 Wind speed correction factor

高度 Z(m)	2	5	10	15	20
修正系数 K_Z	1.25	1.10	1.00	0.96	0.90

查询表 4-1 得到要将 205m 高程的 10min 有效风转换到 200.4m 高程 10min 有效风需乘风速修正系数 $K_1 = 0.96$, 则库水面以上 10m 处 10min 有效风均值 $\bar{W}_1 = \bar{W}_{\text{有效}} \times K = 5.03 \times 0.96 = 4.83 \text{ m/s}$, 标准差为 $\sigma_1 = \sigma_{\text{有效}} \times K = 1.46 \times 0.96 = 1.40$ 。最后, 将风速仪的风速转化为库面风速, 转换系数为 1.3, 故 $W_{\text{面}} = 6.28 \text{ m/s}$, $\sigma_{\text{面}} = 1.82$ 。

根据有效风的均值和标准差, 结合以上计算式将计算得到的风壅高度均值 \bar{X} 和均

方差值 σ_x 以及波浪爬高均值 \bar{R} 代入风浪作用随机组合值的反函数式子中

$$X_i = 0.0012 - 0.0007 \ln(-\ln u_i) + 1.2358 \sqrt{\frac{-\ln(1-u_i)}{\pi}}$$

(4-26)

通过生成大量[0,1]分布的伪随机数代入式子（4-26），得到同一组随机数下水面风壅高度和水面波浪爬高的模拟组合值，其中前二十和后二十模拟组合值如表 4-2 所示。

表 4-2 风荷载随机数组合值前后各二十个
Table 4-2 Random number combinations of wind load values

序号	风荷载随机数	序号	风荷载随机数
1	0.2934	999981	0.7400
2	0.8771	999982	0.4941
3	0.4259	999983	0.8343
4	0.6048	999984	0.0179
5	0.2968	999985	0.8483
6	0.6694	999986	0.7867
7	0.3853	999987	0.7624
8	0.7186	999988	0.5489
9	0.7540	999989	0.5590
10	0.8190	999990	0.4140
11	0.5397	999991	0.5579
12	0.2064	999992	0.8960
13	0.3557	999993	0.2412
14	1.0908	999994	0.4202
15	0.2836	999995	0.7123
16	0.9221	999996	0.3049
17	0.6132	999997	0.1221
18	1.6441	999998	0.6975
19	0.1990	999999	0.4267
20	0.5333	1000000	0.7018
.....			

4.3.3 水位库容关系随机数

水库因运行多年造成的水库冲淤和泥沙移动使得水库的实际库容不断在发生改变。此外，由于测量方法导致的实际水位库容关系曲线和水库工程设计水位库容关系曲线也存在一定的误差^[81]。同一水位下，水库实际库容和测量库容的关系为^[82]

$$V(z) = V(z)_m + 0.1 \times \mu \times V(z)_m$$

(4-27)

其中， $V(z)$ 实际的库容水位关系函数； $V(z)_m$ 为测量得到水库设计库容水位关系函数；

μ 为实际库容和测量库容之间的误差参数； μ 服从标准正态分布，可根据水库的实际情况决定。

表 4-3 为澄碧河水库的水位库容关系。按照标准正态分布规律对水库的水位库容误差参数进行随机模拟，并将生成的误差随机数代入上式，得到实际的水位库容关系。选取任意几个库容误差随机数，绘制水位库容关系曲线于图 4-3。由图 4-3 可知， $\mu=0$ 时为原始的测量水位库容曲线，对于同一个水位，库容随着误差系数 μ 的增大而增大。

表 4-3 澄碧河水库水位库容关系
Table 4-3 Water level reservoir capacity relationship

水位（m）	165	167	169	171	173	175	177	179
库容（亿 m³）	3.40	3.80	4.30	4.83	5.40	5.95	6.60	7.23
水位（m）	181	183	185	187	189	195		
库容（亿 m³）	7.90	8.65	9.40	10.20	11.10	14.05		

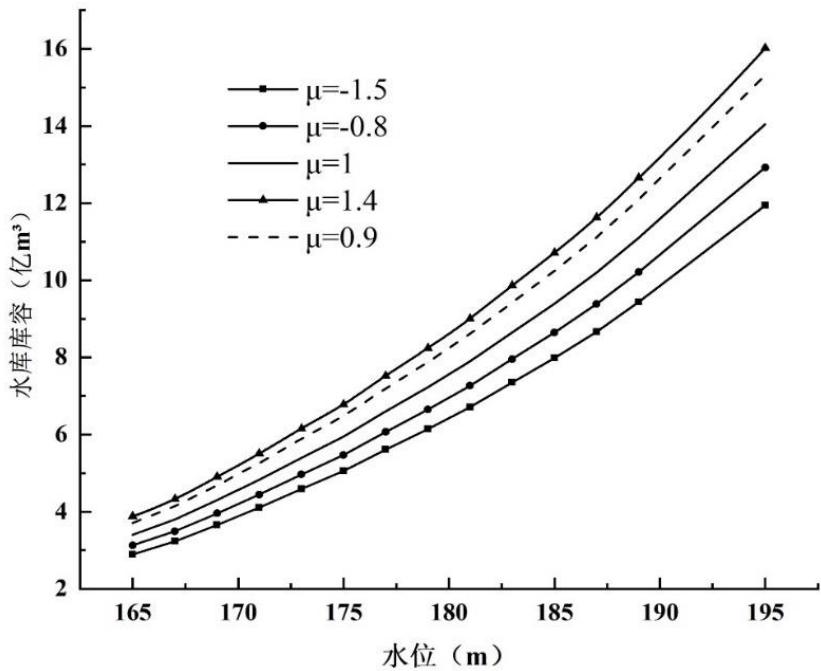


图 4-3 不同 μ 值下的水位库容曲线
Fig. 4-3 Water level reservoir capacity curves at different μ values

4.3.4 泄流能力随机数

水库的泄流能力受多方面因素影响，主要与水库泄洪建筑物的泄洪方式和实际规模尺寸、泄流的测量误差、闸门故障以及水力模型误差等有关^[66]。在这多方面共同影响下，水库实际泄流量和设计泄流量之间存在着一定差异。为减小以上因素带来的误

差，故引入泄流修正系数^[83]

$$q = \varphi q_m$$

(4-28)

其中， q 为实际泄流量， q_m 为水库工程设计泄流量， φ 为泄流量修正系数，服从正态分布 $N(1, \sigma_\varphi^2)$ ， σ_φ 可根据水库泄流设施多年的泄流情况确定。

表 4-4 为 2002 年模型复核的澄碧河水库水位与下泄流量关系表。根据澄碧河水库多年水情统计情况确定水库泄流流量系数标准差，按照正态分布规律随机生成泄流误差系数，按照上式得到水库实际泄流过程。任意选取几个泄流误差系数，绘制不同系数下水库的泄流过程。由图 4-4 可知， $\varphi=1$ 时为水库设计泄流过程，当泄流误差系数 φ 增大时，水库的泄流量会减小。

表 4-4 澄碧河水库水位与下泄流量关系

Table 4-4 Water level in relation to downstream flow

水位（m）	180.6	182.4	183.4	183.7	185.0	186.1	187.2	187.7	188.3	188.9
泄流量（m³/s）	500	1000	1390	1500	2000	2500	3000	3210	3500	3770

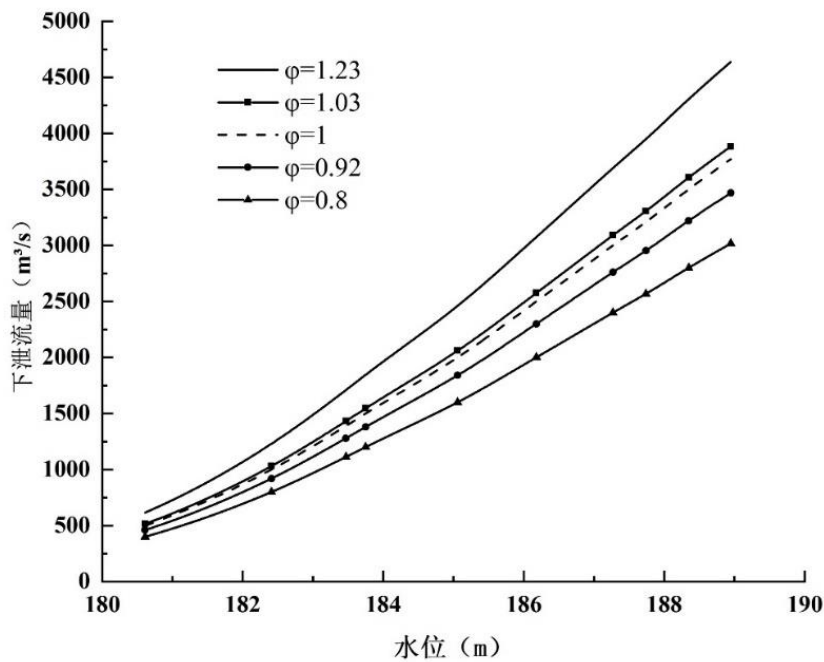


图 4-4 不同 φ 下水库泄流能力曲线

Fig. 4-4 Reservoir discharge capacity curves at different φ

4.3.5 漫坝风险率分析结果

将生成的洪峰随机数采用同倍比放大法缩放水库典型万年一遇洪水作为调洪演算入库洪水过程，并以水库汛限水位 185.00m 起调，将随机生成的一百万组泄流能力误差和水位库容关系误差随机数代入调洪演算过程，调洪演算程序计算后得到 5 组情景下的坝前最高静水位 H_{\max} 各 100 万场，再与风荷载作用下随机生成的风壅高度 e 和波浪爬高 R 随机相加得到考虑水库入库洪水、风荷载作用、泄流误差和库容关系误差下的最高水位 Z ，将其代入风险率计算功能函数，得到几种土地利用情景的漫坝风险率计算结果如表 4-5 所示。

表 4-5 漫坝风险率结果
Table 4-5 Risk rate results

土地利用情景	$Z > D$ 的次数	漫坝失事概率
情景 A	33	3.3×10^{-5}
情景 B	6	0.6×10^{-5}
情景 C	25	2.5×10^{-5}
情景 D	625	6.25×10^{-4}
情景 E	138	1.38×10^{-4}

4.4 漫坝不确定性因素敏感性分析

为了研究漫坝水文和水力两方面不确定性因素对漫坝风险影响程度，本文用不确定性因素的随机变量与最高水位之间的相关关系用来表示不确定性因素对水库漫坝风险的敏感性，拟采用相关分析法计算随机变量和最高水位的相关性。常用的相关关系分析法有三种：Pearson 相关分析法、Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法。Spearman 和 Kendall 相关法具有相同的适用条件，即只要两个变量的观测值是成对的等级评定资料，或者是由连续变量观测资料转化得到的等级资料，不论两个变量的总体分布形态、样本容量的大小如何，都可以用 Spearman 和 Kendall 相关系数法进行相关性分析。而 Pearson 相关分析法应用条件较为严格，要求两个变量之间呈现线性关系，并且都是连续数值。两个变量的总体符合正态分布，或接近正态分布的单峰分布。故本文采用 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法计算不确定性因素的敏感性。

本节旨在量化不确定性因素对大坝漫坝风险的影响。水文方面考虑洪水和风浪作用因素，水力考虑水位库容曲线和水库泄流能力曲线的测量误差，并采用 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关系数分析大坝发生漫坝事件影响因素的敏感性，其主要过

程如下：

- （1）分别随机生成符合正态分布的一万个泄流随机数和一万个库容曲线测量误差随机数以及一万个在同一组风浪作用下的风壅高度和波浪爬高随机组合值；
- （2）采用蒙特卡洛模型的舍选法随机生成一万个洪峰流量随机值，采用同倍比放大法中的峰比放大法放大设计频率为一万年一遇的典型洪水得到一万场设计洪水过程；
- （3）按照水库防洪调度规则结合随机生成的随机数和一万场设计洪水过程进行一万次调洪演算，将本次调洪演算的起调水位设置为水库的汛限水位 185.00m，最终得到一万个坝前最高水位。其中，四个影响因素随机值和调洪演算结果如图 4-6 所示，前后十个值如表 4-6 所示。采用 MATLAB 软件进行 Spearman 和 Kendall 相关性计算，分析最高水位与各影响因素的敏感性。

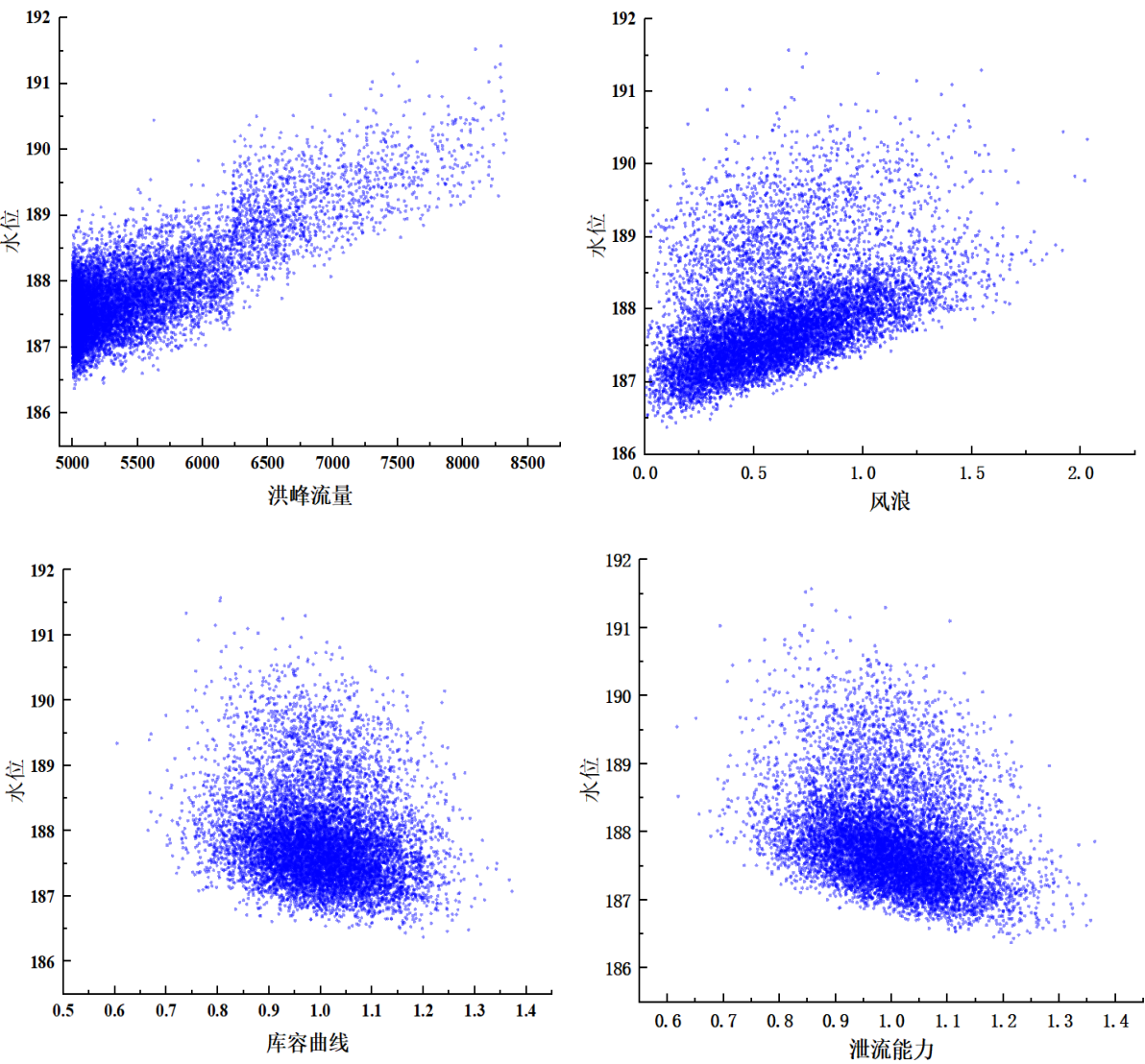


图 4-5 影响因素与最高水位的关系

Fig. 4-5 Influencing factors in relation to maximum water levels
表 4-6 部分影响因素和最高水位

Table 4-6 Influencing factors and maximum water levels

序号	泄流系数	库容系数	洪峰流量	风浪随机数	最高水位
1	1.018	1.153	5296.660	0.905	187.694
2	0.892	0.885	5160.533	1.072	188.419
3	1.103	0.961	5082.643	0.257	186.982
4	1.160	0.911	5067.375	1.090	187.772
5	1.156	1.167	5429.600	0.697	187.293
6	0.955	0.912	5215.262	0.223	187.399
7	1.117	0.870	5372.105	0.398	187.402
8	0.957	1.074	5837.924	0.620	187.968
9	0.974	0.914	5037.776	1.239	188.243
10	0.960	1.291	5604.741	1.276	188.194
...					
9991	1.124	0.829	6997.466	0.588	189.311
9992	1.121	1.061	5151.933	0.890	187.486
9993	1.092	1.117	5238.924	0.589	187.227
9994	1.092	1.102	5348.132	0.419	187.143
9995	1.090	1.071	5531.965	0.981	187.856
9996	0.933	0.973	5435.823	0.170	187.453
9997	1.056	0.775	5675.603	0.799	188.318
9998	1.100	1.010	5009.980	1.060	187.677
9999	0.967	1.088	5235.302	0.551	187.469
10000	1.112	1.035	6132.111	0.555	187.817

考虑设计洪水、风浪作用、水位库容曲线测量误差及水库泄流能力误差不确定性因素对漫坝风险的敏感性分析结果见图 4-6。如图所示，设计洪水、风浪作用、水位库容和泄流误差的 Spearman 秩次相关系数分别为 0.635、0.519、-0.217 和-0.365，Kendall 等级相关分析系数分别为 0.460、0.372、-0.146 和-0.250。对于 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关分析法，相关性系数越接近 1，两变量的相关性越强。综合两种相关分析法，在这四个风险因素中，设计洪水相关性系数的绝对值最大，即该不确定性因素的敏感性最强，说明设计洪水过程对水库调度风险的影响程度最大。水位-库容关系和泄流误差的敏感性系数均为负值，且泄流误差相关性系数的绝对值大于水位-库容关系相关性系数的绝对值，说明这两者与水库风险呈现出负相关的关系，水库库容或下

泄流量减小, 则漫坝风险率会增加, 且泄流误差的敏感性大于水位库容关系误差。

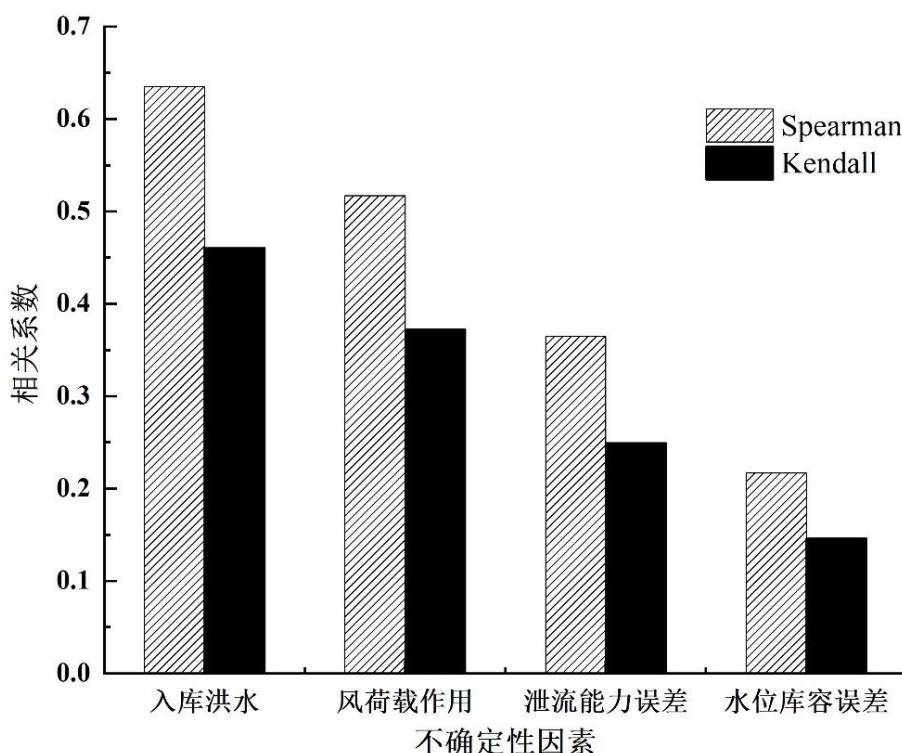


图 4-6 漫坝风险影响因素的敏感性分析结果

Fig. 4-6 Sensitivity analysis results

由以上结果可知, 洪水和风浪的特性对大坝发生洪水漫顶事件的风险率均有较大影响。但洪水与风浪属于概率事件, 具有一定的随机性, 无法从调整水库调度方式方面减小其对漫坝概率的影响。因此, 在进行流量资料和风速资料的频率分析时, 应该注意做好资料的三性审查工作, 延长水文、气象资料序列以减少因资料序列较短而产生的抽样误差, 确保水文和气象序列统计特征参数计算的准确性。从水库调度方面来看, 为了保证防洪安全, 水库应该严格遵守调度规则进行运行调度, 并且应重点关注水位-库容关系、泄流能力等水库特性变化带来的风险问题。

4.5 本章小结

本章基于蒙特卡洛随机模拟法, 建立了考虑入库洪水、风荷载作用、泄流误差、水位-库容关系误差联合影响下的澄碧河水库漫坝溃坝风险率计算模型。考虑水库运行调度中水文、水力两方面不确定性因素带来的风险, 以 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法对水库防洪风险的不确定性因素对水库风险的敏感性进行分析。总结如下:

(1) 通过对流域洪水序列、有效风序列的频率分析得到特征参数, 依次采用舍选抽样和直接抽样法分别生成 100 万个符合一定概率分布的入库洪水、风荷载、泄流误

差、水位-库容关系随机数，通过调洪演算过程计算得到 100 万个坝前最高水位，并统计不同土地利用情景下的漫坝次数，代入风险率计算模型得到不同土地利用情景下水库漫坝风险率，其中耕地主导情景下的漫坝概率为 6.27×10^{-4} ，灌丛情景下的漫坝概率为 1.38×10^{-4} ，现状年情景的漫坝概率为 3.33×10^{-5} ，草地情景下的漫坝概率为 2.5×10^{-5} ，现状年情景下的漫坝概率为 0.6×10^{-5} ；

（2）考虑入库洪水、风荷载作用、水位-库容关系曲线和泄流能力曲线对水库防洪调度的影响，以各个不确定性因素的随机数与经调洪演算后得到的最终坝前水位的相关性表示各个不确定性因素对调度结果的敏感性，从结果来看，风险因素敏感性排序为：入库洪水>风荷载>泄流能力>水位-库容关系，水文方面不确定因素的敏感性大于水力不确定性因素，由此结果，应做好资料的三性审查工作以减少概率事件的随机性给水库带来的风险。

第五章 不同土地利用情景下水库漫坝风险度评价

广义上的风险是指灾害事件发生的可能性及其后果的严重性，本章引入风险度概念，考虑漫坝风险发生的概率以及漫坝风险的生命损失、经济损失、社会和环境损失，对不同土地利用情景下的漫坝风险度进行综合评价，以期给考虑水库和下游防洪安全的流域土地利用规划提供有效的科学依据。

5.1 风险度评价模型

5.1.1 大坝风险度概念

风险的概念最早于 19 世纪末的西方经济学研究领域中被提出，随后陆续被运用于环境科学、自然灾害学、社会科学、经济学等领域。不同研究领域内的学者对风险有着不同的定义，故时至今日国内外学术界对风险尚无统一的定义。传统的风险分析中，将风险定义为意外事故发生的可能性^[84]。随着风险研究学科不断发展，风险的概念被解释得越来越详细，广义风险的概念被提出，许多学者认为广义风险分析工作应包含：不利事件的种类、不利事件发生概率及可能产生的后果。联合国人道主义事务部认为风险度是指对生命、经济和社会环境产生影响可能性和严重性的度量，结合灾害的自然属性和社会特征，提出了自然灾害风险表达式，并规定了各个指数的取值范围：

$$R=H\times V \quad (5-1)$$

其中， R 为自然灾害的风险度； H 为灾害的危险度，与灾害事件发生的概率相关； V 为易损度，体现灾害事件造成后果和损失的严重程度。以上三个参数的取值范围均为 $[0,1]$ 。

5.1.2 风险度等级划分

在许多灾害风险评估研究中，将灾害危险度分为极其严重危险、严重危险、中等危险、轻度危险和基本无危险五个等级；将灾害易损度根据其后果严重程度也划分为五个等级：极高度损失、高度损失、重度损失、轻度损失、极低度损失。该分级方法在漫坝风险度研究中也同样适用，根据表达式，风险度的等级划分标准由易损度和危险度分级来决定。按照布拉德福定律中的区域分析法，在 $[0,1]$ 范围内以 0.2 为跨度，将漫坝易损度和危险度分为 5 个等级，相应风险度也分为五个等级，如表 5-1 所示。

表 5-1 风险度分级表
Table 5-1 Risk Rating Scale

危险度	取值范围	[0,0.2)	[0.2-0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0)
	严重等级	无	轻度	中度	严重	极其严重
易损度	取值范围	[0,0.2)	[0.2-0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0)
	严重等级	极低	轻度	重度	高度	极高度
风险度	取值范围	[0,0.04)	[0.04-0.16)	[0.16,0.36)	[0.36,0.64)	[0.64,1.0)
	严重等级	极低	低度	中度	高度	极高度

水库漫坝溃坝事件属于自然灾害之一，水库漫坝溃坝风险的大小不单单取决于漫坝失事的可能性，还应结合发生漫坝事件的后果和损失进行综合考虑^[85]。研究水库漫坝溃坝的风险度，首先要计算发生漫坝事件的可能性，其次要对漫坝后下游受灾区的各类损失进行合理分类和估算。

5.2 水库漫坝溃坝损失

溃坝损失类别影响因素众多，在目前研究中尚未有统一的划分标准。根据工程运行实际情况和国内外学者众多研究，可大致将漫坝溃坝损失分为生命损失、经济损失及社会和环境损失三类^[35, 86]。

5.2.1 生命损失

生命损失是指大坝溃坝等灾害发生后下游受灾区内的死亡人口数量，在溃坝造成的后果中最为严重^[87, 88]，其影响难以用经济指标衡量。国外学者对溃坝生命损失估算做出了大量研究，如 Brown&Graham（1988）、Dekay&McClelland（1993）、Graham（1999）、Assaf 等，以上研究模型的提出大多基于国外已溃大坝损失数据，但由于国外人口密度远小于我国，且溃坝数量不同，采用这些方法得到的生命损失估算值与我国实际情况相比存在较大差异。周克发^[89]采用国外多个研究成果对我国 8 座已溃大坝生命损失进行了对比计算，结果表明 Graham 法估算结果较好。故从我国历史 8 座已溃大坝的生命损失调查结果中找寻规律，依据 Graham 法的死亡率表分类模式，按照风险人口死亡率 f 与警报时间呈反比关系、溃坝洪水越严重 f 值越大、风险人口对溃坝洪水严重性理解程度越高 f 越小的原则对无案例类型进行了推演，提出了符合我国实际情况的风险人口死亡率建议表，如表 5-2 所示。

表 5-2 周克发法风险人口死亡率建议表

Table 5-2 Recommended mortality table for the population at risk by Zhou

洪水严重程度	警报时间 W_T	公众理解程度	f 建议值	f 建议值范围
高	$W_T > 1.0$	模糊	0.1800	0.0100~0.3000
		清晰	0.0005	0.0000~0.0010
	$1.0 > W_T > 0.25$	模糊	0.2000	0.0050~0.4000
		清晰	0.0010	0.0000~0.0020
	$0.25 > W_T$	模糊	0.7500	0.3000~1.0000
		清晰	0.2500	0.1000~0.5000
中	$W_T > 1.0$	模糊	0.0500	0.1000~0.8000
		清晰	0.0004	0.0200~0.1200
	$1.0 > W_T > 0.25$	模糊	0.1300	0.0150~0.2700
		清晰	0.0008	0.0005~0.0020
	$0.25 > W_T$	模糊	0.5000	0.1000~0.8000
		清晰	0.0750	0.0200~0.1200
低	$W_T > 1.0$	模糊	0.0003	0.0000~0.0006
		清晰	0.0002	0.0000~0.0004
	$1.0 > W_T > 0.25$	模糊	0.0070	0.0000~0.0006
		清晰	0.0006	0.0000~0.0010
	$0.25 > W_T$	模糊	0.0300	0.0010~0.0500
		清晰	0.0100	0.0000~0.0200

在该模型中溃坝洪水严重程度用于表示洪水对居民和下游建筑物的影响程度。根据国外的洪水严重性等级标准，当无建筑物被冲走时，属低严重性洪水；当房屋被洪水冲刷后但仍可提供避难场所时，为中严重性洪水；当洪水的水深和流速足够大到足以冲刷掉下游一切东西时，为高严重性洪水。警报时间是指溃坝警报发布后至下游群众接到警报后开始撤离所间隔的时间，以 0.25h 和 1h 为时间点，将警报时间分为无警报（ $W_T < 0.25h$ ）、部分警报（ $0.25 < W_T < 1$ ）和完全警报（ $W_T > 1h$ ）三种情况。风险人口对洪水严重性理解程度是指受灾人口是否能清晰理解溃坝洪水危险性对洪水可能淹没范围、逃生措施和通道是否明确，是否能及时做出反应并快速撤离。

根据 2015 年的研究，澄碧河水库发生漫坝溃坝后影响到下游约 33.15 万人。对于研究区实际情况，每个区域的警报时间和风险人口对洪水严重性理解程度肯定不同，具体警报时间及下游受灾风险人口对洪水严重性理解程度较难确定，为了得到发生溃坝事件生命损失的最大值，取高危险性洪水下几种预警时间对应六种情况下生命损失的平均值，即 7.7 万人。

5.2.2 经济损失

溃坝经济损失是指由溃坝洪水导致的可由货币直接衡量的损失，大致分为直接经济损失和间接经济损失。直接损失是指洪水淹没造成直接物质损失，表现为已有社会财富的减少。按照行业种类可分为农业、林业、工业、商业、渔业、交通、房屋、邮电、水运等损失，可通过损失率模型和面上综合洪灾损失计算模型估算。

间接损失是由直接经济损失带来的生产和服务受阻带来的行业亏损，影响范围广、涉及到多个行业和部门，因此难以进行定量估算。计算方法主要有直接估算法和系数法。由于直接经济损失和间接经济损失种类繁多，统计工作量大，故本文结合直接经济损失和间接经济损失的相关概念，将澄碧河水库漫坝经济损失总结为第一、第二、第三产业损失。根据 2015 年对澄碧河水库溃坝经济损失的研究，第一产业损失为 118269 万元，第二产业损失为 272393 万元，第三产业损失为 320862 万元，总经济损失为 711524 万元。

5.2.3 社会和环境损失

与生命损失和经济损失相比，社会和环境损失研究成果存在明显不足。社会和环境影响评价初始于 20 世纪 60-70 年代，其行业主观性较强，不同学科、不同专业研究评估的内容和对象大有不同。水库漫坝溃坝属于小概率事件，但漫坝后从坝体溢流而下的洪水将会对下游受灾区的社会经济活动和生态环境造成巨大的不利影响。由于对社会和环境损失研究存在涉及面广、资料匮乏、损失调查工作量大且难以量化等方面等困难^[90]，目前行业内的学者在大坝失事后造成的社会和环境影响评价方面研究还不够深入，尚未建立完整的研究评价体系。王钟仁^[91]提出了如表 5-3 所示的大坝溃坝社会和环境评价指标体系，并依据不同的严重程度确定了各指数的取值。体系中认为社会影响是综合经济、政治、文化、历史的产物，大坝失事后社会方面的影响除了大量人员伤亡造成的生命损失外，还会威胁到国家和社会的安定，影响到受灾区人民的生活质量及水平，给受灾区的人们带来身体和心理上的伤害，对文物古迹、稀有动植物等物质和非物质文化遗产的损失将无法补救；环境方面主要会影响下游河道形态和动植物及其生长栖息地，造成公园和保护区等人文景观的损毁和破坏，威胁到易受影响和易造成重大污染的工业。针对此分类，提出了大坝溃坝社会和环境评价指标体系，不同严重程度下各因素的取值如表 5-3 所示。

表 5-3 大坝溃坝社会 and 环境影响指数取值
Table 5-3 Social and environmental impact index of dam failure

严重程度等级		轻微	一般	中等	严重		极其严重	
社会 影响	风险人口 (人)	1~10	10~10 ³	10 ³ ~10 ⁵	10 ⁵ ~10 ⁷		>10 ⁷	
	<i>N</i>	1.0~1.2	1.2~1.6	1.6~2.4	2.4~4.0		4.0~5.0	
	城市重要 程度	散户	乡村	乡镇	县级市	地级市	直辖市/ 省会	首都
	<i>C</i>	1.0	1.3	1.6	2.0	3.0	4.0	5.0
	设施重要 程度	一般设施	重要设施	市级重要 设施	省级重要设施		国家级重要设施	
	<i>I</i>	1.0	1.2	1.5	1.7		2.0	
	文物古迹 艺术珍品	一般文物	县级文物	省级文物	国家级文物		世界级文物	
	<i>h</i>	1.0	1.2	1.5	2.0		2.5	
	河道形态 影响	河道轻微 破坏	河道一定 破坏	大江大河 一定破坏	一般河流 严重破坏	大江大河 严重破坏	一般河 流改道	大江大河 改道
	<i>R</i>	1.0	1.3	1.6	2.0	3.0	4.0	5.0
环境 影响	生物及栖 息地	一般动植 物	较有价值 动植物	较珍贵动 植物	稀有动植物		世界级濒临灭绝 植物	
	<i>l</i>	1.0	1.2	1.5	1.7		2.0	
	人文景观	自然景观 轻微破坏	市级人文 景观	省级人文 景观	国家级人文景观		世界级人文景观	
环境 影响	<i>L</i>	1.0	1.2	1.5	1.7		2.0	
	污染工业	基本无污 染工业	一般污染 工业	较大规模 污染工业	大规模污 染工业	剧毒污染 工业	核电站	
	<i>P</i>	1.0	1.2	1.6	2.0	3.0	4.0	

本文采用王仁钟提出的方法，以各类损失的影响指数结合研究区水库下游泛洪区情况对社会和环境损失进行定性表达。澄碧河水库下游交通设施有 324 国道、南昆铁路、二级公路及高速公路，保护区耕地 25 万亩、人口 30 万。水库发生漫坝事件后，导致多个市县受到洪水影响，受灾最严重的城市为百色市。百色为广西壮族自治区下辖地级市，建设有国道 G324 及多条铁路和公路，是西南地区出境出海的大通道，被交通运输部确定为国家公路运输枢纽；著名武装战役百色起义发起与百色市，百色市境内的百色起义纪念馆属全国爱国主义教育基地，记载了丰富的革命文化历史，馆内珍藏有国家二级文物；水库发生漫坝溃坝后，对于受灾区的河道和人文景观均产生了轻微的破坏，水库下游均为一般动植物也基本无污染工业，故认为对环境方面的影响较为

轻微。结合 5-3 表及发生漫坝事件后对受灾区的影响，各因子的取值及社会和环境的综合影响系数计算如下

$$\begin{aligned} f &= N \times C \times I \times h \times R \times l \times L \times P \\ &= 2.45 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \\ &= 29.4 \end{aligned}$$

(5-2)

5.3 漫坝易损度估算

5.3.1 综合评价模型

溃坝损失评价是一项系统性工作，需要借助构建相应的综合评价模型实现多方面损失评价结果的综合计算。常见的综合评价模型有模糊综合评价模型^[92]、线性加权平均模型^[93]、灰色综合评价模型等^[94, 95]，其中线性加权法计算简单、计算结果合理、概念清晰。为了科学、合理地估算澄碧河水库发生漫坝事件后的损失严重程度，本文以溃坝生命损失、经济损失和社会及环境损失为评价指标，建立基于线性加权法的澄碧河水库漫坝溃坝风险易损度综合评价体系，模型函数表达式为

$$Z = \delta_1 L_1 + \delta_2 L_2 + \delta_3 L_3$$

(5-3)

其中， L_1 为生命损失指数、 L_2 为经济损失指数、 L_3 为社会和环境损失指数； δ_i 为评价模型中每个影响指数所占的权重。

5.3.2 模型权重

模型权重采用层次分析法进行确定，该方法基本原理为：分析系统中各个要素的相关关系，按照其隶属度分类、分层次构建层次结构模型，比较相邻层次中两因素的重要性，采用萨蒂教授提出的 1 到 9 标度法给重要性程度赋值，构建每个层级的判断矩阵，从而得到权重值，主要分级方法如表 5-4 所示。

表 5-4 1~9 标度法赋值
Table 5-4 The 1~9 scale method

标度赋值	含义
1	表示两因素具有相同的重要性
3	表示两因素相比，前者较后者具有轻微重要性
5	表示两因素相比，前者较后者具有明显重要性
7	表示两因素相比，前者较后者具有强烈重要性
9	表示两因素相比，前者较后者具有极端重要性
2、4、6、8	表示相邻重要程度赋值的中间值

在溃坝损失各因素中, 生命损失 (L_1) 最为重要, 无法用经济衡量, 与经济损失 (L_2) 相比, 前者较后者的重要性程度不亚于强烈。据李雷、周克发等相关学者研究, 经济损失与社会和环境损失 (L_3) 相比较, 前者比后者稍微重要或重要性相同^[96]。综合以上可得到三种因素之间的重要性关系和权重赋值, 即

$$\frac{L_1}{L_2} = 7 \quad (5-4)$$

$$\frac{L_2}{L_3} = \frac{2}{3} \quad (5-5)$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = 1 \quad (5-6)$$

联立三式, 可解出生命损失权重为 0.737、经济损失权重为 0.105、社会和环境损失权重为 0.158。

5.3.3 归一化函数

由于生命、经济、社会和环境损失的单位各不同, 不具有可比性。为了统一单位, 故引进 Deday 提出的归一化函数将损失转化为取值为[0,1]之间的数, 函数表达式为

$$y = a(\lg x)^b \quad (5-7)$$

其中, a 、 b 为参数, $b > 0$, $a = \frac{1}{5^b}$ 。

自 1954 年以来我国发生 3 千余场漫坝事件中, 最严重的属 1975 年板桥水库和石漫滩水库发生的漫坝事件, 据相关统计资料, 死亡人数达 85600 甚至更多。依据此次最严重的漫坝事件造成的死亡人数, 认为生命损失的最大值为 100000, 生命损失的严重程度可分为 1~10, 10~100, 100~1000, 1000~10000, 10000~100000; 经济损失最大值为 100 亿元, 依照其严重程度也可分为五档。依据此数据, 生命损失和经济损失归一化函数的上、下限值得以确定, 即 $x=1$ 时, $y=0$; $x=100000$ 时, $y=1$ 。对于 b 值, 分别计算当取 $b=0.1$ 、0.2、0.3、0.5、1、2、3 情况下的函数值, 得到一组曲线簇, 具体取值可根据每类损失及其严重程度进行确定。

(1) 生命损失

我国建设部于 20 世纪末颁布的《工程建设重大事故报告和调查程序》第 3 号令中将重大事故按生命损失 d 和经济损失 e 分为了四个等级: 若 $d \geq 30$ 人或 $e > 300$ 万元时,

属一级重大事故；当 $10 \leq d \leq 29$ 或 $100 \text{ 万元} < e \leq 300 \text{ 万元}$ 时，属二级重大事故；当 $3 \leq d \leq 9$ 或 $30 \text{ 万元} < e \leq 100 \text{ 万元}$ 时，属三级重大事故；当 $d \leq 2$ 或 $10 \text{ 万元} < e \leq 30 \text{ 万元}$ 时，属四级重大事故。

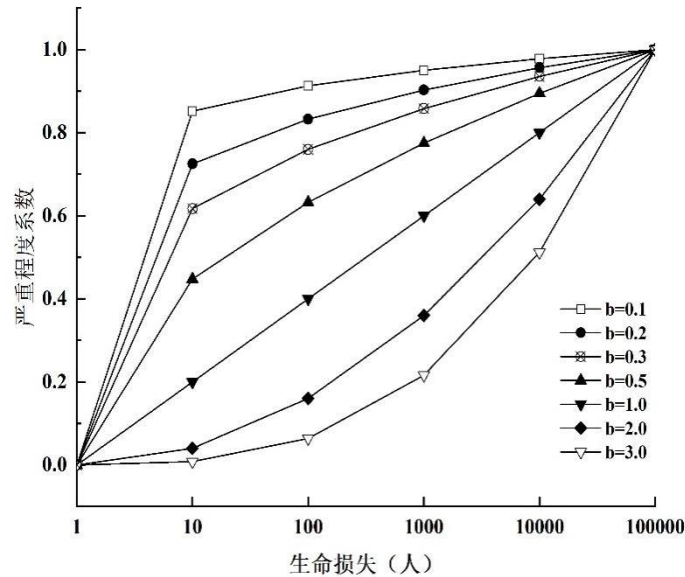


图 5-1 不同 b 值下生命损失严重程度曲线簇图

Fig. 5-1 Clusters of loss of life severity curves for different b values

由曲线簇图 5-1 可知，当 $b=2、3$ 时，只有在生命损失基数足够大时，其严重程度才得以强调，当生命损失基数较小时，严重程度甚微，这显然有悖于国家的法规及“生命高于一切”的理念； $b=1$ 时，即对角线，生命损失与重要程度成均匀线性关系，将生命损失在所有范围内同等看待，这也是不合理的；当 $b=0.1、0.2、0.3$ 和 0.5 时，在基数较小的情况下，生命损失均得到了不同程度的重视。国家法规规定，死亡人数为 10 时，属三级重大事故，死亡人数为 100 时，属严重的四级重大事故。而 $b=0.1$ 情况下，死亡人数为 10 时，严重程度系数为 0.85，死亡人数为 100 时，严重程度系数达到了 0.91，其取值将生命损失放在了最为重要的位置，最符合国家法规对生命损失严重程度的分类。故生命损失的归一化函数为

$$y = \left(\frac{\lg x}{5}\right)^{0.1}$$

(5-8)

其中， x 为生命损失，万人；当生命损失为 7.7 万人时，生命损失严重程度为 0.997。

(2) 经济损失

经济损失的最小值为 10 万元，最大值为 100 亿元，由此确定经济损失归一化函数的上下限。根据国家法规损失严重程度划分情况，当财产损失为 100 万元时，属三级重

大事故。图 5-2 为 b 在不同取值下的曲线簇图。

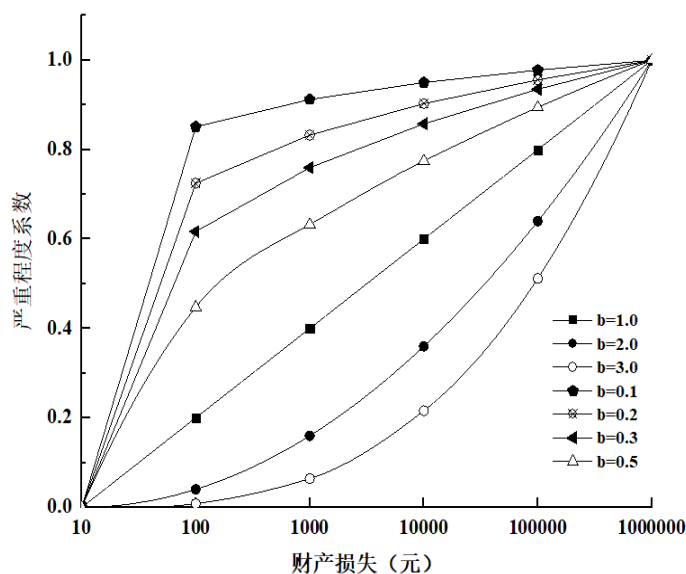


图 5-2 不同 b 值下财产损失严重程度曲线簇图

Fig. 5-2 Cluster of property damage severity curves for different b values

由图 5-2 可知，只有当 $b=0.1$ 、 0.2 时，财产损失的严重系数超过了 0.6，损失的严重程度得以体现。对于我国，生命的价值要远高于经济，故财产损失的 b 值为 0.2。不同的类型的水库工程对于经济损失的承受能力不同，故 b 值需要根据地区的实际情况进行具体测算，为了方便计算，本研究中的 b 值与广大前人研究的取值相同。故财产损失的归一化函数为

$$y = \left(\frac{\lg \frac{x}{10}}{5} \right)^{0.2} \quad (5-9)$$

其中， x 为经济损失，万元；当经济损失为 711524 万元时，经济损失严重程度为 0.994。

(3) 社会和环境损失

社会和环境综合影响系数的下限值由各类影响系数的最小值相乘得到，上限值时=是各类影响系数最大值的乘积。由表 5-3 可知，社会和环境的影响系数的取值范围为[1, 10000]，即对于归一化函数，满足当 $x=1$ 时， $y=0$ ； $x=10000$ 时， $y=1$ 。将上述关系代入式子可得

$$y = \left(\frac{\lg x}{4} \right)^b \quad (5-10)$$

其中， x 为社会和环境损失严重程度。

对于社会和环境损失程度等级未有统一划分，但随着“人与自然和谐相处”等理

念的提出，国家政策对社会和环境越来越重视，社会损失和环境损失严重程度需放在同等位置，因此许多学者认为社会和环境损失呈线性分布，即 $b=1$ ，故社会和环境损失程度系数计算表达式为

$$y = \left(\frac{\lg x}{4} \right) \quad (5-11)$$

其中， x 为社会和环境影响系数；当 x 为 29.4 时，其严重程度系数为 0.367。

综上，可得澄碧河水库漫坝易损度

$$\begin{aligned} Z &= \delta_1 L_1 + \delta_2 L_2 + \delta_3 L_3 \\ &= 0.737 \times 0.997 + 0.105 \times 0.994 + 0.158 \times 0.367 \\ &= 0.897 \end{aligned} \quad (5-12)$$

按照漫坝易损度划分标准，属极高易损度等级。

5.4 漫坝风险度评价

漫坝危险度是与水库漫坝概率相关的函数，由于取值范围为 $[0,1]$ ，故必须通过赋值函数进行转化。

5.4.1 漫坝危险度计算

危险度赋值函数在我国泥石流风险评价工作中运用较为广泛，而在水库防洪安全评价领域研究尚浅，缺乏较为成熟的水库防洪风险度评价体系。目前，运用较广泛的是莫崇勋^[97]于 2014 年和姜庆玲^[80]于 2017 年先后提出的漫坝危险度赋值函数

$$H = \begin{cases} 1 \\ \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \\ 0 \end{cases} \quad (5-13)$$

其中， H 为漫坝危险度； P 为漫坝风险率； P_{\min} 为漫坝风险率可接受的下限值，可取社会公众可接受的漫坝风险率值 10^{-6} ； P_{\max} 为漫坝风险率可接受的上限值，可取水库校核洪水对应的设计频率。

第二套函数在等级划分标准上较第一套做出了改进，使得等级划分较为细致，充分将水库的防洪安全标准和社会公众对洪灾的容忍、接受程度相结合，危险度评价结果考虑较为全面。故本文采用第二套漫坝危险度赋值函数进行考虑风浪作用的不同情境下的澄碧河水库漫坝危险度分析，计算式为

$$H = \begin{cases} 1 & P > 10P_{\text{设计}} \\ \left[\frac{\lg(\frac{P}{P_{\text{社接}}})}{\lg(\frac{10P_{\text{设计}}}{P_{\text{社接}}})} \right]^b & P_{\text{社接}} \leq P \leq 10P_{\text{设计}} \\ 0 & P < P_{\text{社接}} \end{cases} \quad (5-14)$$

其中, H 为漫坝危险度; P 为漫坝风险率; $P_{\text{社接}}$ 为社会公众可接受的漫坝风险率, 一般取值为 10^{-6} , 当 P 小于 10^{-6} 时; $P_{\text{设计}}$ 为大坝防洪设计标准, 可根据水库工程的设计标准确定, 对于澄碧河水库设计标准为千年一遇, 则 $P_{\text{设计}}$ 为 10^{-3} ; b 为系数, 可根据实际大坝实际危险度划分等级推导得出, 此处取 0.8。在此模型中, 漫坝风险率的取值范围为 $[P_{\text{社接}}, 10P_{\text{设计}}]$, 可解释为当 P 小于 10^{-6} 时发生漫坝事件的概率很小, 危险度几乎为零; 而 P 大于水库设计防洪标准时, 水库大坝发生漫坝事件的概率极高但不一定会造成大坝失事, 故将漫坝风险率取值上限设为 $10P_{\text{设计}}$ 。

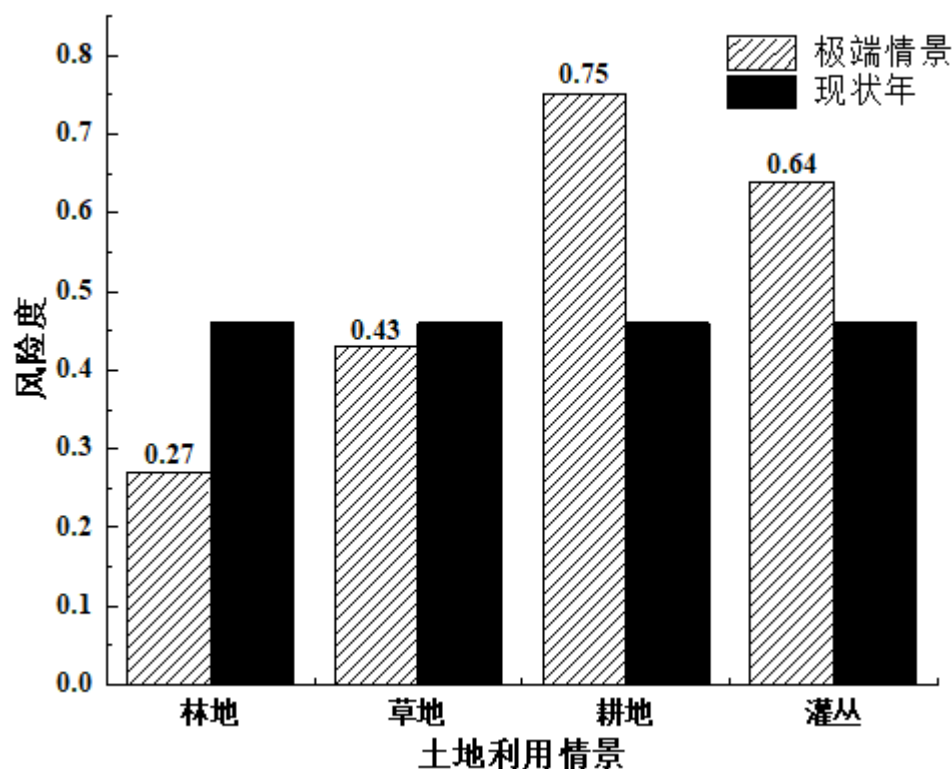


图 5-3 不同土地利用情景漫坝危险度

Fig. 5-3 Overtopping hazards in different land use scenarios

将文章 4.3.5 小节通过调洪过程和功能函数计算得到的考虑入库洪水、风荷载作用、

水库泄流能力、水库水位库容关系不确定性的不同土地利用情景下的漫坝风险率通过赋值函数公式（5-14）转化为漫坝危险度，其结果见图 5-3。由图 5-3 可知，林地主导情景下的漫坝危险度最低，为 0.27，危险度为低度等级，该情景下的漫坝概率较低，水库处于相对安全的状态；草地主导情景和现状年下的危险度相近，分别为 0.43 和 0.46，危险度均属于中度等级；耕地主导情景下的漫坝危险度最高，其值为现状年情景下的 1.64 倍，属于高危险度，水库处于严峻的形式。灌丛主导情景下的危险度为 0.64，是现状年的 1.32 倍，属于高危险度。

5.4.2 不同土地利用情景下的漫坝风险度

莫崇勋等人在风险度的相关研究中，依据漫坝事件发生的概率以及漫坝损失的严重程度，提出了如表 5-5 所示的土石坝漫坝风险度划分等级以及每个等级对应的实际工程意义^[98]，给水库工程的建设与开发提供了指导性的意见。

表 5-5 漫坝风险度等级
Table 5-5 Overtopping risk level

风险度等级	极低风险	低度风险	中度风险	高度风险	极高风险
风险度	0~0.04	0.04~0.16	0.16~0.36	0.36~0.64	0.64~1.00
工程意义及指南	漫坝风险率和漫坝损失都很低，是水库安全运行区和待开发区。	可能遭受的风险和对风险承载能力有所增加，是水库防洪优化的最佳区域。	风险与效益并存，为适宜开发区。在开发时应考虑降低风险并加强风险管理。	漫坝可能性较大，为谨慎开发区。开发时应应最大限度地降低成本投入，控制易损度的增加。	漫坝易损度和风险度极高，具有很大的开发风险，为保证工程安全，故在开发之前，应先降低风险。

将上述章节计算得到的危险度和易损度代入漫坝风险度计算式（5-1）中，得到基于不同土地利用情景的澄碧河水库万年一遇校核工况下的漫坝风险度，计算结果如图 5-4 所示。由图 5-4 可知，现状年情景下的漫坝风险度为 0.41，属于高度风险度；林地主导情景下的漫坝风险度为 0.24，风险度在五种土地利用情景中最低，属于中度风险等级，在此情境下漫坝风险和效益同时存在，适合水库工程开发；草地主导情景下的漫坝风险度与现状年情景的漫坝风险度相近，为 0.39；灌丛主导情景下的漫坝风险度为 0.54，为现状年情景下漫坝风险率的 1.31 倍，草地和灌丛主导情景下的漫坝风险度均属高度风险度；耕地主导情景下的漫坝风险度为 0.67，为现状年情景下的 1.63 倍，

属于极高风险度，在此情景下，水库工程开发具有极大的风险。

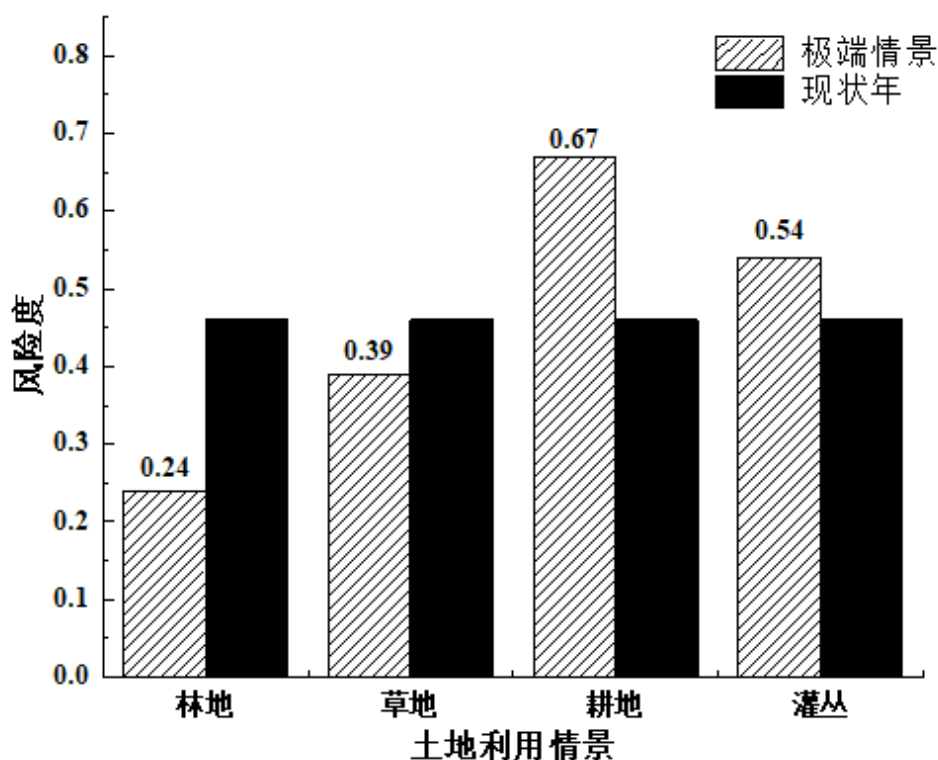


图 5-4 不同土地利用情景漫坝风险度

Fig. 5-4 Risk of overtopping for different land use scenarios

水库下游发生漫坝事件的损失较大，漫坝易损度为 0.897，属于极高易损度。根据以上风险度计算结果，结合流域水库工程为岩溶区水库的特殊性和水库下游保护对象的重要性，从两个方面给出控制流域漫坝风险度的意见：（1）加强流域及下游洪水预警机制，做好在溃坝洪水到来前及时发布警报工作；加强对洪涝灾害的宣传和教育工作，培养下游居民对洪灾的认识意识以及洪灾发生后逃生的措施，从而减少漫坝后的生命损失。（2）在今后的土地规划管理中，为了流域水库工程的防洪安全，建议控制耕地和灌丛的扩张，减少耕地和灌丛在土地利用结构中所占的比例，适当增加林地和草地的种植面积，根据区域土地利用规划章程，采取相应的退耕还林、退耕还草措施。

5.5 本章小结

本章以漫坝风险率和漫坝事件发生后造成的生命损失、经济损失、社会和环境损失为评价指标，应用自然灾害风险度理论，综合评价不同土地利用情景下的漫坝风险度，主要研究内容如下：

(1) 认为事故的风险应该综合考虑事故发生的概率和事故发生后的损失, 根据自然灾害的风险度理念, 评估大坝风险。根据 2015 年损失研究数据, 以生命损失、经济损失、社会和环境损失为评价指标, 建立基于线性加权平均法的漫坝损失评价模型, 采用层次分析法计算权重, 通过归一化函数计算得到澄碧河水库漫坝易损度为 0.879, 属于极高易损度等级。

(2) 将第四章的漫坝风险率数据代入考虑社会公众可接受漫坝风险率的赋值函数, 计算得到不同土地利用情景下的漫坝危险度, 其中耕地、灌丛为主导模式下的漫坝危险度分别为 0.75、0.61, 均属严重等级; 现状年和草地为主导模式下的漫坝危险度为 0.46、0.41, 均属严重等级; 林地为主导模式下的漫坝危险度为 0.27, 属于轻度等级。

(3) 计算不同土地利用情景下的漫坝风险度, 得到耕地为主导模式下的漫坝风险度等级为极高风险, 灌丛主导模式、现状年、草地主导模式下的漫坝风险度均为高度风险, 林地为主导模式下的风险度等级为中度风险。

第六章 结论与展望

6.1 结论

论文以广西百色市澄碧河流域为研究对象，首先采用 HEC-HMS 分布式水文模型，在子流域岩溶区部分添加水库单元以表达岩溶区对流域洪水的滞蓄作用，以历史场次洪水对流域洪水进行率定和模拟，设置极端的土地利用情景，以不同土地利用情景及历史降雨过程驱动模型，得到土地利用变化的水文过程响应；其次建立基于蒙特卡洛随机模拟法的漫坝风险模型，计算不同情景下水库漫坝风险率；最后，对漫坝损失进行定性和定量估算，并采用风险度模型，评价不同土地利用情景下水库的漫坝风险度。研究主要得到以下结论：

(1) 采用 HEC-HMS 模型对澄碧河流域 2002-2018 年的场次洪水进行模拟，并以洪峰流量相对误差、径流深相对误差、峰现时间误差和纳什效率系数为指标，评价模型的模拟精度。根据 HEC-HMS 洪水模拟结果，率定期的 8 场洪水中有 1 场洪水因峰现时间误差超过 3h 而未达到合格标准，率定期合格率为 87.5%，平均 *NSE* 效率系数为 0.83；验证期合格率为 100%，平均 *NSE* 效率系数为 0.80；总体模拟合格率为 91.6%，平均纳什效率系数为 0.83，达到了水文规范的乙级标准，可以用于澄碧河流域的洪水模拟。其中有四场洪水量级较大、降雨较为集中的洪水过程模拟效果较好，平均纳什系数为 0.90，表明本次率定的洪水模拟模型对降雨量较大且降雨相对集中的单峰形洪水过程的模拟效果较好，对降雨过程分散且降雨量小洪水过程的模拟效果欠佳。

(2) 对不同土地利用情景下的、小量级洪水过程进行模拟，由模拟对比结果可知，对流域的调蓄能力：林地>草地>灌丛>耕地。耕地和灌丛在一定程度上会减弱流域下垫面的调蓄能力，使得洪峰流量和洪量较现状年有所增加。此外由于耕地和灌丛地表较为平滑，使得耕地和灌丛主导情景下的峰现时间提前，在一定程度上增加了风险性。而草地和林地则会增大流域的蒸发下渗能力，起到削峰减洪作用；在对双峰形洪水过程的模拟中，耕地主导情景下的峰形最尖锐，表明耕地对降雨的响应最敏感；小量级洪水的洪峰和洪量平均变化率为 75.9%和 39.5%，大量级洪水的洪峰和洪量平均变化率为 66.6%和 32.6%，表明小量级的洪水对土地利用情景变化的响应要大于大量级洪水；无论大、小量级的洪水，洪峰流量的平均变化率均大于洪量的平均变化率，表明土地利用方式的改变对洪峰流量的影响最大。

(3) 在漫坝风险率计算模型中, 识别了入库洪水、风荷载作用、水库泄流能力、水库的水位库容关系作为影响漫坝事件的不确定性因素, 考虑水文随机性和水力不确定性对坝前最高水位的影响, 建立了基于蒙特卡洛随机模拟法的水库漫坝风险率计算模型, 对校核工况下不同土地利用情景的漫坝风险率进行计算。其中, 耕地主导情景下的漫坝概率最高, 为 6.25×10^{-4} ; 灌丛主导情景下的漫坝概率为 1.38×10^{-4} ; 现状年条件下的漫坝概率为 3.3×10^{-5} ; 草地主导情景下的漫坝概率为 2.5×10^{-5} ; 林地主导情景下的漫坝概率为 0.6×10^{-5} 。

(4) 采用 Spearman 秩次相关法和 Kendall 等级相关法进行漫坝不确定性因素的敏感性分析。根据敏感性分析结果, 入库洪水、风浪作用、水位库容关系和水库泄流能力的 Spearman 相关系数分别为 0.635、0.519、-0.217 和 -0.365, Kendall 等级相关系数分别为 0.460、0.372、-0.146、-0.250。在这四个风险因素中, 入库洪水和风浪作用的相关系数均为正值, 说明洪峰流量值和风浪值越大, 发生漫坝事件的概率越大; 而水位库容关系和水库泄流能力的相关系数较小且均为负值, 说明水库库容或下泄流量减小会加大漫坝的风险率。在风险率计算过程中, 应注意随机性序列资料的长度及样本数量对抽样误差的影响。在水库运行调度中, 需要重点关注洪水和风浪随机性的影响, 也需要考虑水位库容关系、水库泄流能力等水力方面的不确定性因素对水库调度的影响。

(5) 根据漫坝损失估算结果和风险度计算结果, 澄碧河水库发生漫坝后易损度为 0.897, 损失等级为极高易损度; 在五种土地利用情景中, 耕地主导情景下的漫坝风险度为 0.75, 属极高风险; 灌丛主导情景下的漫坝风险度为 0.61, 为高风险度; 现状年情景下的漫坝风险度为 0.41, 属高度风险度; 草地主导情景下的漫坝风险度为 0.39, 属高度风险度; 林地主导情景下的风险度最低, 为 0.24, 属于中度风险。在未来流域土地利用规划中, 为了保证流域的防洪安全, 建议限制耕地和灌丛的扩张, 增加林地和草地的面积。

6.2 展望

(1) 为了研究流域下垫面中单一土地利用因素对水文过程的影响, 本研究基于现状年和四种极端土地利用情景进行洪水过程模拟, 这些极端情景与未来土地发展趋势和地方土地利用规划有较大出入, 今后的研究中可按照国家和地方土地利用规划政策结合土地利用反演软件及城镇化发展趋势多设置几种未来时期可能发生的土地利用情景, 为更科学地探讨出考虑防洪规划的土地利用最优情景。

(2) 水库调度中不确定性因素大体分为水力不确定性和水文不确定性, 本文仅考虑了入库洪水、风荷载、泄流能力、库容误差对调度风险的影响, 但具体细分, 不确定性影响因素还有很多, 如调度滞时、洪水预报不确定性等, 今后研究中应考虑更多不确定性因素对漫坝风险的影响。

(3) 在进行漫坝经济损失、社会和环境损失评估工作中, 由于社会和环境损失影响范围广、直接经济损失和间接经济损失又涉及到多个行业且损失统计工作量庞大, 难以对漫坝损失进行具体、详细的估算。本文仅根据前人研究成果, 选择较有代表性的损失因子进行大致估算, 在后续研究中可结合漫坝洪水演进模型计算出淹没范围并建立更合理和全面的灾害评价体系, 对受灾损失进行更详细的统计。

参考文献

- [1] 水利部, 国家统计局. 全国水利发展统计公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [2] SINGH V P. Dam Breach Modeling Technology [M]. Netherlands: Springer Netherlands, 1996.
- [3] 李君纯, 李雷, 盛金保, 等. 水库大坝安全评判的研究 [J]. 水利水运科学研究, 1999 (01): 79-85.
- [4] 李清富, 龙少江. 大坝洪水漫顶风险评估 [J]. 水力发电, 2006(07): 20-22+30.
- [5] 张大伟. 美国 Edenville 溃坝事件原因分析与启示 [J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(02): 70-74.
- [6] 付军. 大清河流域土地利用变化对洪水影响的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(05): 1-12.
- [8] 杨丽萍, 邹进. 土地利用变化对盘龙江流域产流过程的影响分析 [J]. 中国农村水利水电, 2020(07): 36-40+45.
- [9] 冯平, 付军, 李建柱. 下垫面变化对洪水影响的水文模型分析 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(03): 189-195.
- [10] NYIKADZINO B, CHITAKIRA M, MUCHURU S. Rainfall and runoff trend analysis in the Limpopo river basin using the Mann Kendall statistic [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2020(117):1-11.
- [11] ZEKOUDA N, MEDDI M, LAVANCHY G T, et al. The Impact of Human Activities on Flood Trends in the Semi-Arid Climate of Cheliff Basin, Algeria [J]. Water Resources, 2020, 47(10): 409-420.
- [12] 杨阳, 时璐, 王岗, 等. 湟水流域洪水极值时间演变特征及趋势归因分析 [J]. 中国农村水利水电, 2019(08): 98-104.
- [13] 刘松, 陈立华, 丁星臣, 等. 西江流域主要水文站近 40 年径流变化分析研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 52-55.
- [14] SAGHAFIAN B, FARAZJOO H, BOZORGY B, et al. Flood Intensification due to Changes in Land Use [J]. Water Resources Management, 2008, 22(8): 1051-1067.
- [15] 莫淑红, 巩瑶, 李洁, 等. 人类活动对岔巴沟流域洪水过程影响研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(03): 492-508.

- [16] 张建军, 纳磊, 董煌标, 等. 黄土高原不同植被覆盖对流域水文的影响 [J]. 生态学报, 2008(08): 3597-3605.
- [17] WHITEHEAD, P.G, ROBINSON. Experimental basin studies—an international and historical perspective of forest impacts [J]. J HYDROL, 1993, 145(3-4): 217-230.
- [18] 董国强, 杨志勇, 于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(03): 111-117+126.
- [19] ONSTAD.C.A, JAMIESON.D.G. Modeling the Effect of Land Use Modifications on Runoff [J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1287-1295.
- [20] MAO.D, CHERKAUER.KA. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region [J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(1-2): 71-82.
- [21] NIGUSSIE T A, ALTUNKAYNAK A. Assessing the Hydrological Response of Ayamama Watershed from Urbanization Predicted under Various Landuse Policy Scenarios [J]. Water Resources Management, 2016, 30(10): 3427-3441.
- [22] ZOPE P E, ELDHO T I, JOTHIPRAKASH V. Hydrological impacts of land use—land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India [J]. Natural Hazards, 2017, 87(3): 1267-1283.
- [23] VANESSA D S, FRANCOIS L, CAMILA A, et al. Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon [J]. Water, 2018, 10(4): 11-19.
- [24] AZIZI S, ILDEROMI A R, NOORI H. Investigating the effects of land use change on flood hydrograph using HEC-HMS hydrologic model (case study: Ekbatan Dam) [J]. Natural Hazards, 2021, 109(05): 145-160.
- [25] 舒晓娟, 陈洋波, 任启伟. 基于 Wetspa 模型的流域植树造林的洪水响应 [J]. 人民长江, 2009, 40(24): 6-8.
- [26] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应 [J]. 水科学进展, 2014, 25(01): 21-27.
- [27] 张兰影, 庞博, 徐宗学, 等. 古浪河流域气候变化与土地利用变化的水文效应 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(01): 42-46.
- [28] 毛慧慧, 肖磊, 张建中. 人类活动对官厅山峡设计洪水影响分析 [J]. 水文, 2017, 37(05): 70-73.
- [29] 高玉琴, 王怀志, 陆晓华, 等. 基于 LUCC 的秦淮河流域暴雨洪水响应分析 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35(06): 47-52+66.

- [30] 包瑾, 李国芳. 秦淮河流域城镇化的洪水响应研究 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(07): 73-77.
- [31] 张洪波, 支童, 卫星辰, 等. 基于 SWAT-MODFLOW 的黄河中游区径流过程模拟及对黄土高原变绿的响应 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(06): 1-10.
- [32] BEN CHIE Y. Risks in Hydrologic Design of Engineering Projects [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96(4): 959-966.
- [33] WOOD, ERIC. An Analysis of Flood Levee Reliability [J]. Water Resources Research, 1977, 13(3): 665-671.
- [34] TUNG Y, MAY S L W. Optimal Risk-Based Design of Flood Levee Systems [J]. Water Resources Research, 2010, 17(4): 843-852.
- [35] 李雷. 大坝风险评价与风险管理 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [36] 楼渐逵. 加拿大 BC Hydro 公司的大坝安全风险管理体系 [J]. 大坝与安全, 2000, 14(4): 7-11.
- [37] 廖井霞. 基于事件树和贝叶斯网络法的土石坝风险评价研究 [D].北京:中国水利水电科学研究院, 2013.
- [38] ANCOLD. Guidelines on Risk Assessment,Australian Committee on Large Dams [J]. 1994.
- [39] ANCOLD. Guidelines on Risk Assessment,Australian Committee on Large Dams [J]. 2003.
- [40] KWON H H, MOON Y I. Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concepts for existing dams [J]. Stochastic environmental research risk assessment, 2006, 20(4): 223-237.
- [41] YUEFENG S, HAOTIAN C, ZHENGJIAN M, et al. Solution method of overtopping risk model for earth dams [J]. Safety Science, 2012, 50(9): 1906-1912.
- [42] GOODARZI E, SHUI L T, ZIAEI M. Risk and uncertainty analysis for dam overtopping – Case study: The Doroudzan Dam, Iran [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2014, 8(1): 50-61.
- [43] 徐祖信, 郭子中. 开敞式溢洪道泄洪风险计算 [J]. 水利学报, 1989(04): 50-54.
- [44] 谢崇宝, 袁宏源, 郭元裕. 水库防洪全面风险率模型研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(02): 72-75.
- [45] 姜树海. 大坝防洪安全的评估和校核 [J]. 水利学报, 1998(01): 19-25.

- [46] 莫崇勋, 董增川, 麻荣永, 等. “积分-一次二阶矩法”在广西澄碧河水库漫坝风险分析中的应用研究 [J]. 水力发电学报, 2008(02): 44-49.
- [47] 袁晶瑄, 王本德, 田力. 白龟山水库防洪预报调度方式研究及风险分析 [J]. 水力发电学报, 2010, 29(02): 132-1388.
- [48] 王冰, 冯平. 梯级水库联合防洪应急调度模式及其风险评估 [J]. 水利学报, 2011, 42(02): 218-225.
- [49] 刁艳芳, 段震, 张荣, 等. 梯级水库群联合防洪预报调度方式风险分析 [J]. 水力发电, 2018, 44(08): 82-86.
- [50] 刘章君, 许新发, 成静清, 等. 基于 Copula 函数的大坝洪水漫顶风险率计算 [J]. 水力发电学报, 2019, 38(03): 75-82.
- [51] 黄灵芝, 云甲, 司政, 等. 基于入库洪水随机-模糊性的土石坝漫顶失事风险分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(09): 766-772.
- [52] 孙乃波, 刘克琳, 程亮, 等. 考虑洪水地区组成不确定性的水库下游防洪风险率计算 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(01): 44-48.
- [53] 马天航, 丁锐, 黄尔, 等. 基于 HEC-HMS 模型的通口河流域洪水预警研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 80-89.
- [54] 谭超, 黄本胜, 黄峰华, 等. 基于 SCS 水文模型的城市河涌设计洪水计算研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019(03): 167-171+178.
- [55] 栾承梅, 梁忠民, 仇少鹏, 等. 山丘区小流域 SCS-Nash 产汇流模型应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(02): 246-254.
- [56] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [57] 马俊清. HEC-HMS 模型在颍河上游流域洪水预报中的应用研究 [D]. 河南: 华北水利水电大学, 2020.
- [58] 刘佳嘉, 周祖昊, 贾仰文, 等. 河道烧录算法提取出断裂河网的必要条件探究 [J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 21-22+36.
- [59] 莫崇勋, 覃俊凯, 段丽敏, 等. 基于 Burn-in 和 D8 法的岩溶区流域边界提取研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(1): 248-253.
- [60] 周林滔, 杨国范, 杜娟. 河道烧录法在凌河流域河网提取中的应用 [J]. 农业科技与装备, 2014(05): 50-52.

- [61] 章毅之. 基于 GIS 的流域数字划分方法; proceedings of the 新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“农业气象与生态环境”分会论文集, F, 2003 [C].
- [62] 覃俊凯. IMERG 卫星降水数据在岩溶区径流模拟中的适用性研究--以下甲流域为例 [D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [63] 程根伟. 确定性水文模拟的数学模型研究 [D]. 南京: 河海大学, 1988.
- [64] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨 [J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33.
- [65] 董国强, 杨志勇, 于赢东. 下垫面变化对流域产汇流影响研究进展 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(03): 111-117+126.
- [66] 王之中. 改进的蒙特卡罗法漫坝风险及不确定因素研究 [J]. 2022(5): 135-138.
- [67] 李强, 管昌生, 周武. 基于 Monte-Carlo 法的滑坡稳定可靠性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001(S1): 1674-1676.
- [68] 王薇. 土石坝安全风险分析方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [69] 张艳红, 吴勇. 基于 Monte Carlo 方法的任意概率密度随机数字信号发生器设计 [J]. 电子科技, 2004(8): 45-48.
- [70] 吴飞. 产生随机数的几种方法及其应用 [J]. 数值计算与计算机应用, 2006, 27(1): 48-51.
- [71] 刘振, 张梅. 常见几种分布随机数产生原理及实现途径 [J]. 中阿科技论坛(中英文), 2020(11): 95-97.
- [72] 王仲奇, 宋玉琳, 肖刚, 等. 蒙特卡罗方法的两个基本问题 [J]. 原子核物理评论, 2005(04): 395-397.
- [73] 杨振海, 程维虎. 非均匀随机数产生 [J]. 数理统计与管理, 2006, 25(06): 750-756.
- [74] 赵雪峰. 一种伪随机数生成算法的研究与实现 [J]. 智能计算机与应用, 2005, 00 (06): 25-26.
- [75] 朱晓玲, 姜浩. 任意概率分布的伪随机数研究和实现 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(12): 116-118+168.
- [76] 杨振海, 张国志. 随机数生成 [J]. 数理统计与管理, 2006, 25(2): 244-252.
- [77] 王丙参, 魏艳华, 孙永辉. 利用舍选抽样法生成随机数 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2013, 30(6): 86-91.

- [78] 吕弯弯, 顾圣平, 何蕾, 等. 基于蒙特卡罗法的土石坝洪水漫顶风险率计算及其敏感性分析 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 48-52+56.
- [79] CHEN.J, ZHONG.P.A, ZHANG.Y, et al. A decomposition-integration risk analysis method for real-time operation of a complex flood control system [J]. Water Resources Research, 2017, 53(3): 2490-506.
- [80] 姜庆玲. 土坝水库汛期分期调度防洪风险定量评估模型研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [81] CHEN. J, ZHONG.P.A, XU.B, et al. Risk Analysis for Real-Time Flood Control Operation of a Reservoir [J]. Journal of Water Resources Planning Management, 2015, 141(8): 1-10.
- [82] 胡栋. 水库防洪调度风险综合评估与阈值研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [83] HUANG.K.D, YE.L, CHEN.L, et al. Risk analysis of flood control reservoir operation considering multiple uncertainties [J]. Journal of Hydrology, 2018(565):672-684..
- [84] 闻珺. 洪水灾害风险分析与评价研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [85] 何晓燕, 孙丹丹, 黄金池. 大坝溃决社会及环境影响评价 [J]. 岩土工程学报, 2008(1): 1752-1757.
- [86] 葛巍, 焦余铁, 李宗坤, 等. 溃坝风险后果研究现状与发展趋势 [J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 143-151.
- [87] 胡亮, 钟启明, 陈亮, 等. 溃坝损失评估方法研究进展 [J]. 人民黄河, 2022, 1-8, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1128.TV.20220216.1320.002.html>.
- [88] 王志军, 宋文婷. 溃坝生命损失评估模型研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(03): 205-210.
- [89] 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究 [J]. 安全与环境学报, 2007(03): 145-149.
- [90] 张莹. 基于能值足迹法的溃坝环境、生态损失评价 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [91] 王仁钟, 李雷, 盛金保. 水库大坝的社会与环境风险标准研究 [J]. 安全与环境学报, 2006(01): 8-11.
- [92] 赵利, 李昕, 周晶. 基于模糊层次综合模型的溃坝后果评价研究 [J]. 安全与环境学报, 2009, 9(2): 176-180.
- [93] 任兴国. 溃坝后果严重程度评价模型探讨 [J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(06): 120-121.

- [94] 赵利, 李昕, 罗显枫, 等. 溃坝后果的灰色模糊综合评判研究 [J]. 人民黄河, 2010, 32(01): 113-115+117.
- [95] 陈兵. 大坝溃决风险灰色评估理论与方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [96] 李新华. 基于层次分析法的水电站工程的风险评价与风险管理研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [97] 莫崇勋, 杨绿峰, 麻荣永, 等. 水库土坝漫坝危险度评价 [J]. 人民黄河, 2010, 32(05): 134-135+137.
- [98] 莫崇勋, 刘方贵. 水库土坝漫坝风险度评价方法及应用研究 [J]. 水利学报, 2010, 41(03): 319-324.

致谢

相逢一见太匆匆，校内繁华几度红。行文此处，落笔之处，也意味着美好难忘的大学生活即将结束。我与广西大学的缘分，始于 2015 年秋，终于 2022 年夏，目之所及，皆是回忆，心之所向，皆是过往，好像尤其不舍今年的夏天。

忘不了篮球场上空橙红色烂漫的夕阳，忘不了躺在田径上好似触手可及的璀璨星空，忘不了从宿舍到办公室一路上的清脆的鸟叫与蝉鸣，忘不了在水科所 410 里与你们的那片欢声笑语与紧张激烈的会议讨论……总觉得来日方长，学生时代无忧无虑的日子可以无限延长，殊不知减法是人生最终的运算符。学位论文的完稿将为我的大学学习生活画上完整的句号。回想初到西大结识的同学、志同道合的朋友、诲人不倦的老师，你们的陪伴与教导，充实了我硕士研究生三年的生活。

首先，我真诚地感谢我的导师莫崇勋教授在近两年中对我硕士毕业论文的悉心指导。莫老师教给我们的不光是学校的专业知识，还有终生受用的为人处世的态度和道理。研究生三年，莫老师严于律己宽于待人的品格，认真负责以及凡事都要提前做好从充足准备的工作态度，给我留下了终生难忘的印象，是我终生学习的榜样。在此，特向恩师致以最诚挚的谢意和最崇高的敬意。

其次，父母之爱子，则为之计深远。感谢父母二十余载的细心培养和教育，感谢他们在我求学路上的无私支持和伟大付出，在我失落时鼓励陪伴，在我报喜时让我戒骄戒躁，一直做我最坚强的后盾和避风港。感谢爷爷奶奶外公外婆的宠爱，孙儿虽然不能经常陪在你们身边，但你们的爱却一直温暖着我。研究生三年，谢谢长辈们的支持与理解，祝愿长辈们身体健康，万事如意。

再次，感谢师门的师兄杨庆、阮俞理、雷兴碧、赖树锋、张明山、蓝华鲲、陈颢剑，师姐王亚芳在我学业上的帮助，尤其感谢阮俞理、蓝华鲲、陈颢剑师兄以及同课题组王国帅同学在我英文小论文和毕业大论文上的悉心指导，没有师兄的指导和鼓励，我的论文将困难重重。感谢同级邓娟、邓云、赵梳玥、祝灿，从开始的不熟到最后的共同毕业，一路走来我们互相陪伴、互相加油打气、互相见证成长。感谢师弟朱翰林、宋轩、沈越、姜长浩、晏智威、苏启化，师妹龙诗婷、岑炜燕、刘光明、陈新茹、孟雪琛、万筱宇、包蒙香、汤佩玉，你们的活泼热情点燃了办公室的气氛，与你们相处的日子每天都开心，祝愿大家事事顺心，学业顺利。

“不用每天缠绵，随时保持联系，你知道我不会走，我知道你不会变，相互惦记、

各自忙碌，开心时有人分享，难过时有人陪伴，有话直说，有事明说，聊天时不用避讳，相处时不用拘束。”这是杨绛先生人为的朋友之间最舒服的相处方式，而我身边正好有这样一群朋友。我们无话不说，我们之间的默契好似这世界上的另一个自己，工作时我们互相鼓励互不打扰，闲暇时我们一起聊天、嬉戏。感谢刘娉婷、邓娟、林烨、徐杰的一直陪伴，大学生活，让我们之间结下了深厚的友谊，广西大学和你们共同构成了我最美好的青春年华，此去经年，告别学生时代，而我们依旧如初。

最后，我还要感谢一路走来从未放弃的自己。哪怕面对未知的未来，心中虽充满忐忑与畏惧但你仍然勇敢向前迈步，科研学习的道路虽崎岖艰难，感谢你咬紧牙关不放弃。你是被光选中的人，一生追着光、靠近光、成为光、最后散发着光。愿你，不管以哪种身份，都能成为更好的你！

“希望在奔赴未来的路上，我们有生生不息的热爱，如星灿烂，如风自由”，大学东路 100 号，广西大学，未来祝好，后会有期！

攻读学位期间科研情况

一. 已发表学术论文

- [1] Mo Chong-Xun, **Wu Yi-Fan**, Risk and benefit analysis of multifunctional reservoir staged operating [J]. Water Supply, 2021, 21(07):3330-3343. (导师一作, 本人二作)

二. 参与的科研项目

- [1] 《基于长短期优化调度嵌套的西南岩溶区流域智能调度决策研究》, 51969004, 2019-03 至今, 国家自然科学基金; (主要参与, 在研)
- [2] 《气候变化和人类活动影响下岩溶区流域水文气象演变规律及径流响应研究》, 2017GXNSFAA198361, 2017-11 至 2020-11, 广西自然科学基金; (主要参与, 已结题)
- [3] 《气候变化和人类活动对广西典型岩溶区河川基流的影响研究》, YCBZ2019022, 2019-04 至 2021-04, 广西研究生教育创新计划项目; (主要参与, 已结题)