DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.17

黑龙江河道演变及工程整治技术的研究

康 璐[1,3], 向 波[2], 张 婧[1,3], 王 东[2], 杜 康[1], 童 钦[1]
(1. 西华大学 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 3. 西华大学 流体机械及工程四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘 要: 黑龙江属于国境界河,其河道演变问题不仅是自然科学问题,更事关国土面积的增减,有十分重要的现实意义。通过梳理近30年来黑龙江河道演变及工程整治技术的研究成果,从河道演变、暴雨洪水、河道整治3个方面总结了研究进展,得到如下结论:黑龙江河道演变、水沙运动相关的研究成果稀少且陈旧,尤其缺乏系统性、长序列的河道演变分析;黑龙江防洪抗灾技术经历了"被动"获取、"主动"获取和"超前"获取3个阶段;受限于国界河和高寒地区的双重属性,工程整治使用的防护材料应符合流域特点,工程型式也需尽量简化布置。

关键词: 河道演变; 河道整治; 河势稳定; 暴雨洪水; 黑龙江
中图分类号:TV213.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2022)05-0138-10

River evolution and engineering regulation technology of Heilongjiang River

KANG Lu[1,3], XIANG Bo[2], ZHANG Jing[1,3], WANG Dong[2], DU Kang[1], TONG Qin[1]
(1. *Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu* 610039, *China*; 2. *Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu* 610041, *China*; 3. *Key Laboratory of Fluid Machinery and Engineering, Sichuan Province, Xihua University, Chengdu* 610039, *China*)

Abstract: Heilongjiang River is an important boundary river which marks the border between China and two other countries. Its river course evolution is not only a natural science problem, but also a grave matter of the increase or decrease of China's land area. By analyzing the research results of river course evolution and engineering regulation technology of Heilongjiang River in recent 30 years, we summarizes the research progress from three aspects, namely, river course evolution, rainstorm flood and river regulation, and draws the following conclusions. Firstly, the relevant research results of river course revolution and sediment movement of Heilongjiang River are rare and dated, which lacks of systematic and long-term analysis in particular; secondly, the flood and disaster prevention technology of Heilongjiang River has experienced three stages, from passive acquisition to active acquisition and then advanced acquisition; thirdly, limited by the geographical location and climatic conditions, the engineering regulation measures should be carried out with suitable protective materials and simplified layout.

Key words: river course evolution; river regulation; river regime stability; rainstorm flood; Heilongjiang River

1 研究背景

黑龙江流域地处亚洲东北部,跨蒙古、中国、俄罗斯3个国家,属于高纬度寒区河流,全长5 498 km,流域面积为184.3×10^4 km^2。黑龙江干流年内径流变幅大,径流以雨水补给为主、积雪融水为辅[1-2]。关于水沙变化,上、中游基本同步,年内分布集中于汛期,年际变化呈减小趋势[3]。黑龙江干流研究河段概况如图1所示。

黑龙江干流岛屿众多,受到国界河的政治因素制约,难以实现全面的水文监测,已有的水文径流数据系列较短,导致河道治理措施和技术缺少充分的

收稿日期:2021-12-15; **修回日期**:2022-05-12
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407301);四川省研究生创新基金项目(YCJJ2021062);四川省交通科技项目(2016B2-2)
作者简介:康 璐(1997-),女,四川广元人,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。
通讯作者:张 婧(1986-),女,湖北武汉人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水力学及河流动力学以及山区河床演变。

理论依据,河岸及洲岛的防护加固工程在设计和施工上受到限制。另一方面,受到俄方的工程干扰,岸坡坍塌、水土流失现象频发,国土面积流失的风险大大提高[4-5]。同时,黑龙江流域历史上爆发过多次全流域大洪水,加剧了干流沿线的岸边崩塌,导致河势急剧恶化。为了遏止岸崩、抵抗洪水、稳定河势[6],专家学者们不断对防洪技术进行创新[7-8],针对黑龙江这类高寒干流因地制宜地提出了河道治理措施[6,9]。

本文主要从河道演变规律、暴雨洪水研究、防护工程布置 3 个方面对近 30 年以来黑龙江河道演变及工程整治技术的研究进展进行梳理分析,进而对未来的研究方向提出建议。

2　研究热点及趋势

Web of Science(WOS)核心合集并未收录关于黑龙江干流河道演变及工程整治技术的文献,这大概是因为国境界河的特殊属性。本文将 1990 – 2022 年收录于中国知网(CNKI)的文献作为数据源,以“黑龙江河道演变”和“黑龙江干流工程整治”为关键词进行筛选,删除与主题无关的文献,发现自 1990 年以来,相关文献仅百余篇,与长江、黄河相关研究文献的万篇量级以及淮河、珠江相关研究文献的千篇量级比较,相差 1 ~ 2 个数量级。借用 Citespace 软件对文献计量信息进行可视化分析,结果如图 2 所示。

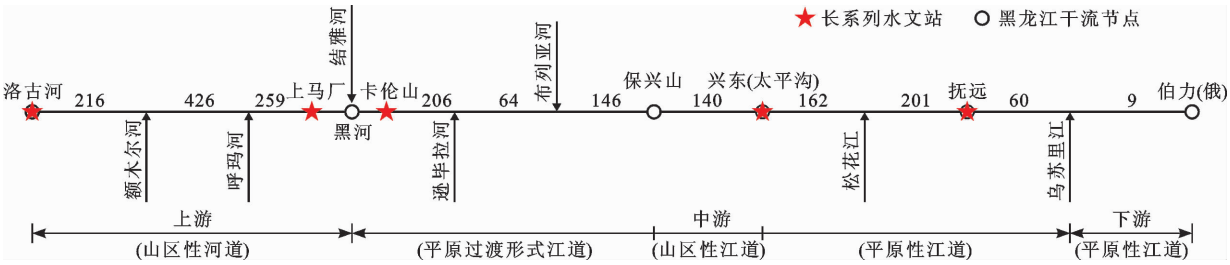

图 1　黑龙江干流研究河段概况示意图(单位:km)

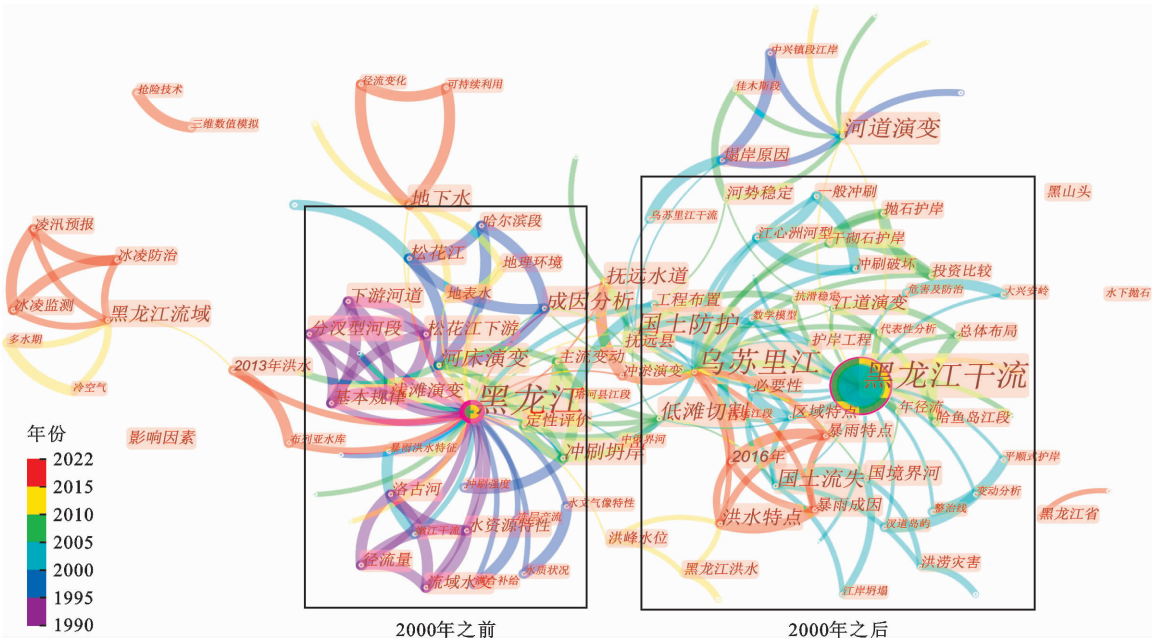

图 2　1990 – 2022 年黑龙江干流河道演变及工程整治技术文献关键词共线图谱

黑龙江以及乌苏里江作为中俄国界河,河道演变直接影响着国土面积的流失,只有充分认识清楚河道演变的规律才能够为国土防护提供有力的依据。如图 2 所示,检索显示近 30 年研究文献中出现的高频词汇有黑龙江干流、黑龙江、乌苏里江、河道演变、国土防护。2000 年之前,已经开始对黑龙江河道演变规律有一些基本的认识,主要是对某些特殊河段进行成因分析。2000 年之后,关于黑龙江干流及乌苏里江的研究文献数量明显增加,尤其是数学模型和遥感技术的广泛运用,加强了对重点河段的河道演变及其治理方案的研究,并开始重视暴雨洪水的影响,国土防护布置方案(包括工程型式与

材料等)进一步细化。

3 河道演变规律

3.1 黑龙江干流

如图 1 所示,黑龙江干流上、中游我国境内长系列水文站较少,由上游向下游依次为洛古河、上马厂、卡伦山水文站,以及 2013 年后增设的太平沟和抚远水文站,共计 5 个。因黑龙江干流水文资料系列较短且数据类型较少,导致黑龙江中、上游水沙时空分布、沿程泥沙级配等水沙特性的相关研究稀少。目前仅沈铭晖等[3]根据黑龙江上、中游的洛古河、上马厂、卡伦山 3 个典型水文站 1988 – 2008 年的实测水沙资料,对黑龙江上中游上段河道的水沙动力特性做了定量研究,该时段 3 个水文站的水沙变化如图 3 所示。分析图 3 可知,黑龙江水沙变化在上、中游基本同步,年内分布集中于汛期,年际变化呈减小趋势,输沙量占全年九成以上。同时可确定黑龙江干流上洛古河、上马厂和卡伦山 3 个水文站的造床流量分别为 3 137、4 580 和 6 538 m^3/s。该结果确定了塑造河流形态的水沙条件指标,为黑龙江全干流的河道整治提供了理论参考。

黑龙江的右岸岸滩、洲岛冲淤演变直接影响国土面积的流失,但是黑龙江的“先天条件”不容乐观。一是在柯式力的作用下,右岸侵蚀加剧[4];二是岸边植被稀少,土质松散;三是高寒地区凌汛破坏不可抗拒;四是降雨年内分配不均,7 – 8 月份流量大,水流的动能大。加之黑龙江中下游汊道众多,弯道纵横,弯道横向环流现象显著,致使黑龙江干流凹岸冲刷或崩岸频发,低滩切割严重,洲岛演变剧烈。现有的公开文献对于黑龙江干流洲岛演变的研究主要基于系列较短的历史实测资料,且资料收集年份多为 20 世纪 80、90 年代,或者是套绘河势演变图及典型河道断面图与近期资料进行对比,再结合河流动力学、河床演变学原理进行现象描述或逻辑推理,得出黑龙江干流河道冲淤的定性分析结论,而缺少定量的研究成果去指导河道整治工程开展因地制宜的设计。

河道的冲淤一直是针对黑龙江干流的研究热点。随着信息采集技术的进步,少量学者在遥感技术的支持下,利用数学模型模拟预测界河的变迁趋势[10-12]。冷莉等[13]研究发现黑龙江干流冲淤变化及其强度总体呈现上游小于中游。王志兴等[14]对中游松花江入口处进行了三维数值模拟研究,认为此处冲淤变化强度大,且涉及面积广。

河势的稳定性分析主要通过河相关系表征,用以描述来水来沙条件与河床地质条件相适应的均衡形态,具体指标包含纵横向稳定性指标、横向可动性指标、弯曲度等。由于长江、黄河的相关研究成果比较成熟,冷莉等[5,13]参考黄河、长江的河相关系,得出黑龙江干流纵向稳定、横向欠稳定的结论,并结合地形图套绘和河流动力基本理论对黑龙江干流上、中游多处大型汊道分布及其演变特点进行了研究。现有的研究多是针对黑龙江干流典型河段进行分析,尽管典型河段的研究成果能够为黑龙江干流的河道演变规律提供一定参考,但是由于依据资料陈旧短缺、机理性的分析不够深入,因而具有较强的局限性,难以为治河思路提供科学可靠的理论依据。

黑龙江黑河段的整治重点是弯道切割、江心岛发育以及凹岸冲刷等问题,图 4 显示了不同时期黑龙江干流中游临江镇典型江段的江心洲形态,由图 4 可以直观地观察到弯道、江心岛、凹岸的演化过程。随着遥感技术的不断成熟,潘世兵等[11]运用遥感数据重点分析了黑河凹岸和江心洲的演变规律,并建立了数学模型预测今后河道的冲刷速率。黑河段凹岸江段的岸边线变化最为显著,河道不断冲刷,主流和汊道不断发展;同时江心洲范围扩大、推移使得河道冲刷更为剧烈,塌岸严重,基于此,曹修玉等[15]分析了塌岸的成因,并提出了相应的整治对策。

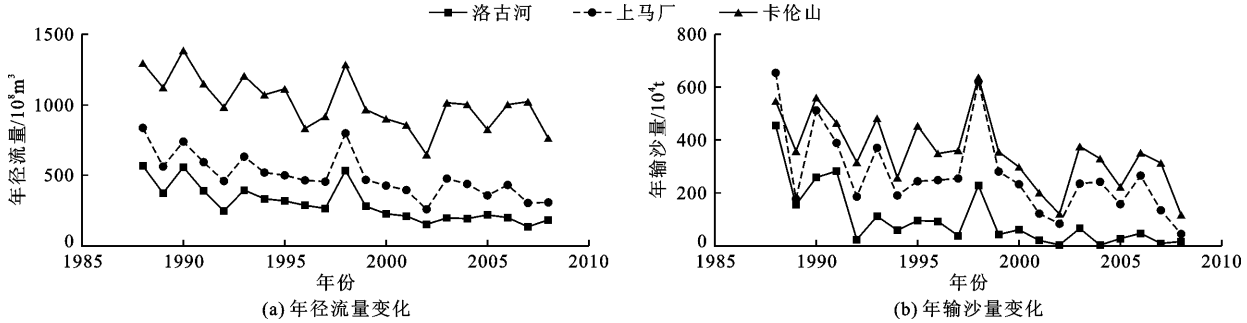

图 3 1988 – 2008 年黑龙江干流洛古河、上马厂、卡伦山水文站水沙年际变化[3]

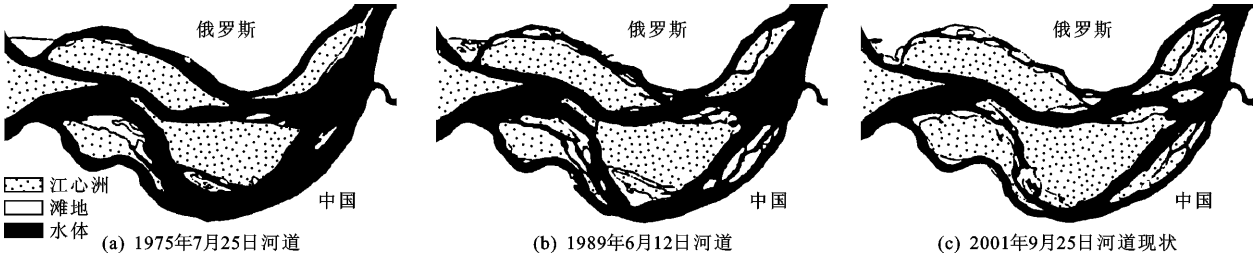

图 4　黑龙江干流中游临江镇典型江段江心洲演化过程[11]

雪水温江段作为黑龙江干流最典型的复杂分汊河段,必须加以控制,否则主支汊易位不仅会造成洲岛变化,同时也会导致主流剧烈摆动,引起中俄纠纷。宗原等[10]利用二维水沙数学模型模拟了无护岸条件下雪水温江段 20 a 的冲淤变化,提出此处凹岸比较稳定,但是河道主流在主汊与支汊之间摆动剧烈。雪水温江段“大水淤积,小水冲刷”的河道演变特征导致河中段河势稳定性较差[16]。

哈鱼岛江段是黑龙江干流最典型的边滩切割河段,江面宽广辽阔,洲岛、汊道发育,宽滩上存在大量交织散乱的汊道及串沟。但该江段相关研究的文献报道十分有限,卜汉臣[17]对比了 1957 及 1988 年的地形图岸线,认为由于裁弯比较大,漫滩水流深,加之河岸土质松散,导致低滩串沟发育,形成了新汊夺流,造成主江改道,致使国土产生争议。

抚远水道上接黑龙江干流,下连乌苏里江,是连接黑龙江与乌苏里江的唯一水道,与黑龙江干流、乌苏里江形成三角洲,三角洲内部有两岛三汊交错分布,如图 5 所示。

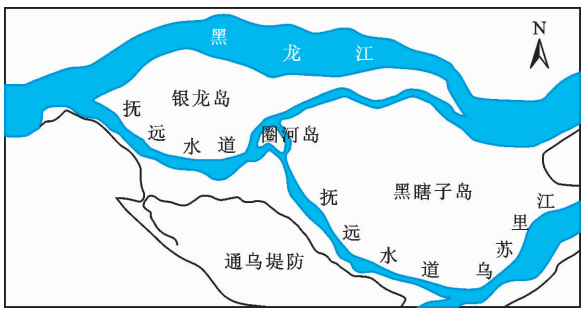

图 5　黑龙江抚远水道平面示意图[19]

抚远水道河床基本处于略淤或冲淤平衡状态,总体河势相对稳定[18]。抚远三角洲内部黑瞎子岛呈现出“一岛两国”的现状,俄侧汊道具有发展条件,但其植被茂盛,我国一侧汊道更易发展成主流,因此研究三角洲内的河道演变规律极为迫切。戴春胜[12]、卢玉海等[19]建立了数值模型对抚远江段演变进行模拟,并预测未来抚远水道的冲淤分布情况与河床演变趋势。结果表明:受阿穆尔齐克河道的顶冲,抚远镇处形成淘刷;大夹信子岛北汊河床淤积,南汊少量冲刷;两汊出口两侧冲岸条件成熟,岛后存在潜在淤积区。

3.2　主要支流

如图 1 所示,黑龙江干流共有 7 条支流汇入,除了结雅河、布列亚河在俄罗斯境内,其余支流全部位于中国境内。其中,关于河道演变的相关研究以松花江最多,乌苏里江其次,额木尔河、呼玛河、逊毕拉河的相关研究十分有限,甚至为空白。

松花江属于中国内河,水文资料相对容易获取,学者们通过整理分析松花江干流各水文站实测水文资料、套绘实测大断面比较图、套绘 70 年代地形图与现状卫星地图,对松花江泥沙运动及河道演变状况进行分析,图 6 为 1968 与 2003 年松花江干流哈尔滨市区某河段河势演变。松花江干流横纵向总体相对稳定[20],但河段内部分区域存在裁弯取直、冲刷塌岸等现象,严重影响河势[21]。松花江自同江汇入黑龙江,交汇处产生壅水,导致河床河势稳定性差,主要体现在河道与滩地的平面形态和冲淤等变化较大。王志兴等[14]对松花江汇口江段进行了三维数值模拟研究,提出部分河段的岸堤有可能发生冲蚀,应加强保护。

学者们基于充足的输沙、径流、降雨等资料,采用小波分析法、累计曲线法、M – K 次序分析法等对松花江的泥沙颗粒特性和水沙变化进行分析[22-25]。研究发现,松花江干流河床质为中细沙(0.005 ~ 0.6 mm),下游较中上游床沙粒径偏小[26],且河道中泥沙大多为均质细沙,不同水文期松花江干流河床质泥沙颗粒级配曲线如图 7 所示。故松花江是以推移质造床为主、悬移质为辅的少沙河流,水沙搭配基本协调,以径流来沙为主。松花江干流江段和佳木斯江段的输沙量增加趋势缓慢,而哈尔滨站输沙量减少趋势显著。其中哈尔滨段河势总体稳定,仅滩岛迎流位置多有冲刷,岛尾略有淤积,局部深点有淤平趋势[27]。

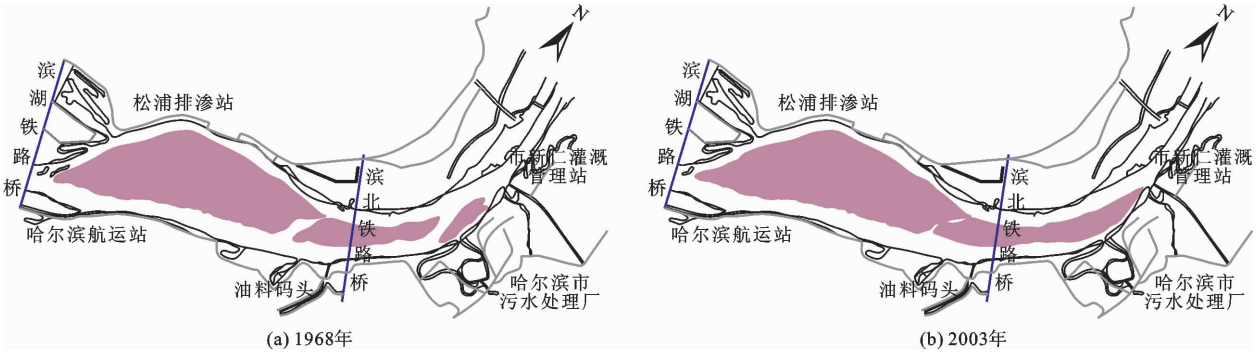

图 6 1968 与 2003 年松花江干流哈尔滨市区某河段河势对比[20]

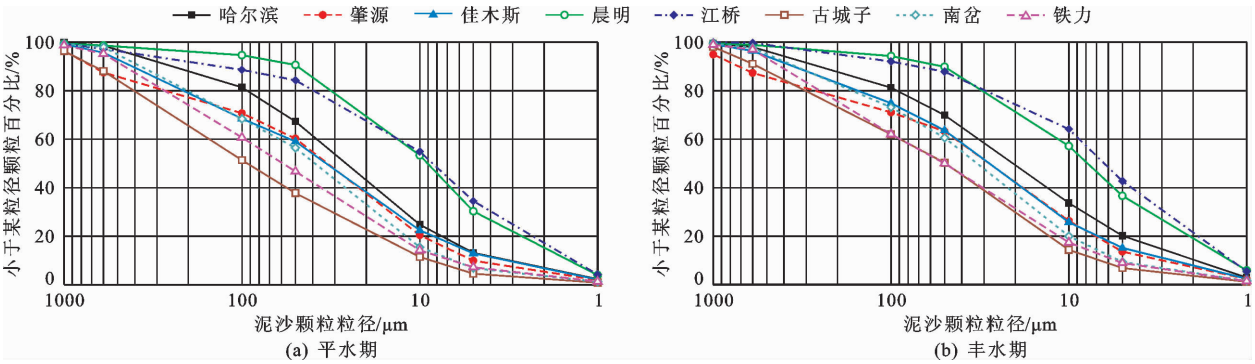

图 7 不同水文期松花江干流各河段河床质泥沙颗粒级配曲线[23]

乌苏里江为中俄界河,整体以淤积变迁为主,下游侵蚀和淤积强度在整个变迁过程中最强[28]。我国一侧地质及洪水灾害频发:塌岸退岸切滩严重、主流变动频繁、汊道不断发展,导致国界线向中方偏移,造成严重的洪涝灾害和大面积国土流失。乌苏里江岸线崩塌的主要原因包括江岸地势低洼、岸坡抗冲能力低、洪水的冲击等,同时河流常年还经受冰排撞击以及冻融循环的作用[29-30]。基于上述塌岸影响因素,孟令辉等[31]建立了乌苏里江饶河段河岸稳定性评价体系,该成果可为类似河段塌岸地质灾害的防治提供科学参考。

从以上分析来看,由于松花江、乌苏里江两条支流的水文资料相对容易获取,目前有关黑龙江流域的研究多集中在这两条支流。其中,松花江的河道演变以及水沙变化规律已较为清晰,而乌苏里江的相关研究主要集中在地质灾害发生的原因以及如何整治河道、稳定河势方面。

综上所述,由于黑龙江的国境河属性,对其干流及主要支流地形的测量受限,致使大范围地形资料短缺。所以黑龙江河道演变的精细研究难以开展,目前学者们主要根据水文数据和局部河段的地形资料进行研究,因此关于长河段、长时间河道演变及水沙运动的研究成果十分有限。根据已有研究成果认为,黑龙江干流纵向稳定,横向欠稳定,水沙变化在上、中游基本同步,其年内分布集中于汛期,年际变化呈减小趋势,汛期输沙量占全年的 90% 以上。在不理想的“先天条件”制约下,河道中游右岸岸滩及洲岛的冲淤变化较剧烈,而上游比中游的冲淤变化小。黑龙江各典型河段的河道演变特征存在显著性差异,比如黑河段塌岸严重;雪水温江段“大水淤积,小水冲刷”;哈鱼岛江段低滩串沟发育;抚远水道圈河岛南汊易淤积等。这均与黑龙江整体堤岸防护程度偏低有关,从而导致河道状况不够稳定,所以及时采用有效的工程措施和技术手段来稳定河道已刻不容缓。

4 暴雨洪水特征

对于防护程度偏低的黑龙江干流,暴雨洪水的冲击对河道具有强烈的冲刷破坏作用。根据主要控制站的系列水文资料,可以总结出以下 3 点水文特性:(1)黑龙江干流为少沙河流,年内与年际降雨分配不均,汛期多集中在 7、8 月份;(2)由于地处高纬度区,易发生冰塞、冰坝等引起河流壅水;(3)径流以雨水补给为主,积雪融水为辅[32],黑龙江干流流域上各水库起到了良好的蓄洪补枯作用[33]。黑龙江流域大洪水多发生在 7、8 月份,分别在 1958、1984 和 2013 年爆发

了全流域大洪水,沿线百姓受灾严重,造成了严重的经济损失。除了区间来水,洪水主要来源是春季融雪和夏季降水形成的地表径流,由于前两次洪水发生时期的监测技术不成熟,也缺乏相应的研究,因而没有数据资料记录及文献报道。

针对 2013 年黑龙江流域暴雨洪水的研究报道比较详细[1-2,34],表 1 汇总了 2013 年黑龙江干流主要控制性水文站的洪水特征值[35]。此次暴雨洪水的成因主要是大气环流异常,导致黑龙江流域降水量较常年同期偏多 30% ~40%[2];同时,结雅河、布列亚河及松花江支流区间来水提高了黑龙江干流的洪水量级,所以在上述双重作用叠加下,越往下游洪峰量越高,造成河道持续高水位,发展成为 1961 年后历史第 1 位的特大暴雨洪水[34-36]。由于当时黑龙江干流缺少水库、蓄滞洪区等调蓄工程,为了及时有效地控制此次洪水,俄方的结雅水库、布列亚水库采取了超常规调蓄运行方式,对黑龙江干流洪水削峰、错峰作用显著,保障了下游干流的安全[1]。

由于国境河具有一定的政治敏感性,常常难以实施传统的工程措施,如修建水库、堤防及设置蓄滞洪区等[37],所以应多利用非工程措施减少洪水灾害损失。基于黑龙江洪水量及洪峰大的特点,并结合流域特征,黑龙江的防洪抗灾技术得到不断的总结和创新,防洪技术概况详见表 2。

表 1　2013 年汛期黑龙江干流主要控制性水文站洪水特征值统计表[35]

水文站	2013 年洪水特征值			历史洪水特征值			警戒水位/m	水位历史排名
	水位/m	时间	流量/$10^4(m^3\cdot s^{-1})$	水位/m	时间	流量/$10^4(m^3\cdot s^{-1})$		
上马厂	98.04	08-16T18:00	1.21	96.96	1998-6-30	1.26	97.00	1
黑河	97.62	08-16T15:00	1.21	99.13	1958-7-20	2.25	96.00	4
卡伦山	97.74	08-16T14:00	2.35	95.30	1998-6-30	1.70	95.00	1
奇克	100.30	08-18T05:00	2.39	100.61	1958-7-23	2.72	98.85	3
乌云	100.25	08-20T12:00	2.88	100.40	1984-8-20	3.00	97.50	2
嘉南	100.88	08-23T18:00	2.92	100.47	1984-8-22	2.79	97.00	1
萝北	99.85	08-25T00:00	2.96	99.57	1984-8-23	2.37	97.80	1
回江	56.06	08-29T05:00		54.98	1984-8-24	2.89	54.00	1
勤得利	48.65	08-28T23:00		47.15	1984-8-26	2.78	46.35	1
抚远	89.88	09-02T00:00	4.08	88.33	1984-8-29	2.78	87.50	1

表 2　黑龙江防洪技术概况

时间	技术方法	具体描述
2014	单站设计洪水位[38]	利用单站设计洪水位推求黑龙江干流设计水面线,该方法的不足之处在于上游洪水水面线需要下场大洪水数据进行合理性检验。
2014	《黑龙江省黑龙江干流堤防应急度汛工程初步设计报告》[39]	该报告对黑龙江干流 2013 年洪水进行了全面的调查分析,首先对各站设计洪水按洪水水位系列(包括凌汛洪水位)排频计算,其次收集汇总了干流各站设计洪水成果,为后续黑龙江干流工程建设提供了依据。
2015	FY-3A/MERSI 数据[40]	该技术基于 FY-3A/MERSI 数据和 GIS 技术,利用 ARCGIS 中已建模型实时监测洪水水情变化。
2016	混合门限回归模型[7]	以混合门限回归模型预报洪水误差最优,且其在预报洪峰水位结果也最佳。
2018	走航式 ADCP[8]	可迅速完成大洪水期间的应急测验,获得高水位条件下不同水位级的流量数据,同时结合 Excel、AutoCAD 软件快速绘制出河流横断面图。
2021	基于 GEE 遥感云平台提取水面[41,42]	利用 GEE 遥感云平台,大幅提高了传统影像下载和桌面端处理海量影像数据的效率,大大缩短提取流域内常年水面和季节性水面的时间。

通过归纳 2013 年以来黑龙江防洪技术的发展，总结其大致经历以下 3 个阶段。

(1)“被动”获取阶段。由于初期水文监测技术不够成熟和全面，黑龙江干流的水文计算方式多采用试算和间接计算，防护方案侧重于保护。

(2)“主动”获取阶段。该阶段监测技术不断创新发展，鉴于洪水发生的随机性，防洪技术越来越朝着自动化、连续、无人值守的方向发展。将实测数据与编程语言、Excel、GIS 技术、遥感平台等结合起来监测洪水水情变化，实现监测与洪水演进同步，首先减少了人工需求，其次计算更为精确，最大程度地降低了人为误差。

(3)“超前”获取阶段。黑龙江干流洪水灾害时有发生，需要不断提高洪水预报精度。首先对 2013 年大洪水做全面的分析调研，为后续黑龙江干流洪水研究提供宝贵的经验参考；再通过总结归纳历次洪水调查，建立预报洪峰、确定洪水位的模型，最终采用自动化的仪器进行监测，迅速提供洪水数据，将灾害损失降至最低。

目前，现代科技已广泛应用于洪水管理领域，例如不断加强防洪信息系统自动化、提高数据精确程度，使相关洪水预警系统逐步完善，在一定程度上保障了水文气象的预报精度及洪水管理效率。

5 防护工程布置

黑龙江汊道众多、边界物质松散、河道蜿蜒曲折，低滩切割、凹岸冲刷、切岛(洲)改道、边岸坍塌灾害频发[4,43]，土壤流失的风险较高，为防止国土面积减少必须对其进行有效的工程防护，以稳定江道流向，限制江汊发展。黑龙江干流的治理必须遵循河流演变的自然规律，因势利导、因地制宜地提出河道河势治理方案[44]。冲积型河流的河道控制工程一般分为防止冲刷坍岸整治线、防止切滩整治线以及稳定主流控制汊道变化的整治线[43]，但是受限于黑龙江高寒气候和国界河的客观约束条件，资料匮乏，研究难以深入，导致河道治理理论和技术研究滞后，制约了河道治理工作的开展。

黑龙江属于高纬度河流，冬季长达 8 个月，平均封冻期大于 150 d，受其特殊的水流流量、河道形态和水文气象条件的影响，上、中游极易发生凌汛灾害[45]。其中流冰、冰排对于护岸的撞击不容忽视(图 8(a))，同时，冻融循环造成的护岸破坏也是非常明显(图 8 (b))，这些都会造成江岸坍塌。与低纬度河流相比，虽然治理的手段措施基本相同，但是受水动力 - 冻胀/冻融耦合作用的影响，黑龙江防护材料的选择需要考虑季冻区流域的特点[42]：一是应具有较高的水力糙率，主要是减少冰排的冲击作用。二是应具有较强的耐久性，即材料要有一定的自愈能力。三是应采用适应冻胀变形的柔性防护[6]，以减少凌汛的影响。

(a) 护岸抵抗冰排撞击　　(b) 混凝土板护坡冻胀隆起

图 8　黑龙江防护工程典型破坏形式[6]

基于黑龙江干流各河段的破坏类型和成因不同，一般采用将护岸布置与多种整治工程措施相结合的综合防护治理措施。由于国境河流的政治敏感性，工程治理中多以护岸为主，难以采取削坡方案，而且为了防止基础被掏空，造成护坡块石脱落，其护脚应深入到当地侵蚀基准面以下，同时加强植被种植，减少水土流失和风浪冲刷。为了加快施工速度，同时省工省料，黑龙江河道防护可以应用模袋混凝土，筑堤土料建议在冬季备料[46]。鉴于已建工程冰坝作用破坏非常严重，建议使用抛石护岸的结构型式[47]。目前黑龙江干流堤防工程多为砂性土原料，工程完工后的不均匀沉降易造成工程破坏。可见分析堤防在汛期的破坏机理[48]以及提出适用于黑龙江干流砂性堤防的建设方案[49]十分必要。黑龙江河道防护治理措施总结如表 3 所示。

结合前文中总结的黑龙江河道演变特征，发现该河道的破坏类型主要表现为冲刷塌岸、低滩切割。但是河道整治的工程型式受到限制，河道治理时不能修筑对河势和水流流势产生影响的控导工程，例如解决分流顶冲方向控制问题，只能在分流口上游利用岸线导流控制流向，或在洲头布置不同方向的鱼嘴控制调整分流。因此，目前对于黑龙江的防护形式比较单一，最为有效的工程措施和技术主要是因地制宜地布置护岸，固岸固汊。对于易发生冲刷塌岸的河段，比如分水岛头、“S”弯道，无法采用坝式或墙式护岸，只能采用依岸贴坡的平顺护岸[47]，避免额外修建坝体和挡墙而引起国际争端。对于容易被切割的滩地，多通过布置护岸加固工程，覆盖整个切割范围边沿，以此保护大片滩地的连续完整，同时加固边界以保护汊道进口不再发展，固岸保土。

表 3　黑龙江干流防护治理措施汇总

破坏类型	成因	河段	护岸布置
冲刷塌岸	与江岸地质条件、水流的侧向侵蚀作用、流向集中和顶冲程度、风浪淘刷、岸边植被状态及冰排撞击等作用有关。	孙吴县胜利屯上游江段[9]	护岸按 20 年一遇洪水位设计,起于东霍尔莫津护岸尾端,终于胜利屯村西原堆石护岸起点,全长 1 850 m。其中洪水位以上至岸顶护岸为草皮护坡,以下采取干砌石固脚、现浇混凝土板护坡、砾石垫层及无纺布反滤的工程结构型式。
		塔河县江段[9]	主要在江段已建护岸下游、反“S”弯道的上部增设护岸,同时在古城岛岛头、大河西村之间的汉道上设堵汊固床工程。
		黑河市江段	护坡护岸、锁坝等工程,并与生物措施相结合固岸保土。
		抚远江段[12]	将南汊固床工程和分流鱼嘴工程相结合进行整治。
		同仁江段[50]	对于易崩塌的河道岸边,采用水下抛石护岸,深泓以上采用混凝土板护砌结构型式。
低滩切割	洪水主流集中顶冲;洪水漫滩水深大,主流线取直、背沟串沟发育。	嘉荫雪水温江段[10]	护岸主要布置在雪水温上下段,包括分水岛头防护,同时增加雪水温固床措施。
		抚远江段[12]	南汊固床工程和分流鱼嘴工程相结合进行整治。
		大草甸子段[51]	加固岛头,布置导流护岸,总长 1 750 m。
		马伦至盘古河口段[51]	全面覆盖马伦原建已毁护岸 2 216 m,并延长护岸 1 284 m 至汊道口下,护住汊道进口不发展,同时保证江道主流不串入内汊。
		怀柔站段[51]	该段低滩切割变化缓慢,漫滩洪水取直切割变化微弱,布置 1 500 m 怀柔站护岸。
		新基街至翻身屯段[51]	为护住弯道上部,使水流导向俄侧,布置新街基护岸 4 700 m;同时对下游南熟什岛、前进屯、翻身屯布置防冲刷护岸,保证整个滩地不再发生切割。
		呼玛镇至呼玛河口段[51]	为保障整个切割范围连续完整,在呼玛上江岛 2 500 m、呼玛镇上下游 1 250 m、龙头山 2 500 m 流域范围内布置护岸保护近 30 km^2 的大片滩地不发生变化。
		二道卡至白石砬子段[51]	为了防止内汊发展切滩,在该段建设护岛头导流护岸,总长 2 000 m。

6　结　论

黑龙江的河势稳定有重要的意义,但其河道演变研究滞后,治理水平不高。本文从河道演变规律、暴雨洪水研究、防护工程布置 3 个方面梳理了黑龙江河道演变及工程整治技术的研究成果,得到了以下几点结论:

(1) 黑龙江作为中俄国界河,河道政治属性强,水文测量工作难度较大,目前的研究成果数据基础较差;已有的研究成果多是定性分析或者粗略的定量估算,难以归纳总结出适合于黑龙江自身特点的河道演变及水沙运动规律,理论和技术研究滞后制约了河道治理水平。

(2) 基于黑龙江暴雨洪水的洪峰量极高、高水位持续时间长、影响范围广的特点,结合高寒地区流域特征,黑龙江防洪抗灾技术的发展主要经历了 3 个阶段,即“被动”获取阶段、“主动”获取阶段和“超前”获取阶段。

(3) 与低纬度冲积型河流相比,黑龙江干流极易发生凌汛,流冰、冰排对于边岸的撞击以及冻融循环造成的冲刷作用十分显著,所以防护材料的型式选择需要更加贴合黑龙江流域的特点。同时,鉴于

黑龙江作为国界河的敏感性,工程型式上也会受到限制,应尽量简化工程布置。

7 展 望

针对黑龙江河道演变研究滞后、河道治理程度较低、灾害防治水平不高等现状,对今后的研究方向提出以下几点展望:

(1) 黑龙江干流岛屿众多,汊道密布,是典型的分汊型河流,但是现阶段少有针对黑龙江典型分汊河段分流分沙的观测,岸滩崩塌或洲滩消长规律等研究也相当匮乏。限于数据的保密性,可以考虑采用室内试验、数值模拟及野外调查相结合的手段,重点对河道造床过程及洲滩、岛屿的冲刷、变形重塑过程进行研究。

(2) 黑龙江复杂河道的洪水演进受到复杂河型、支流汇流、蓄滞洪区调度运行方式、冰凌等多方面因素叠加影响,但是目前缺少对于黑龙江长距离复杂河道洪水叠加与演化规律的研究。受限于黑龙江干流长距离以及复杂的来流条件,建议采用河道洪水演变模拟技术,重点关注高寒地区特有的封冻期和流冰期,定量识别基于两岸控制性工程调度运行方式下以及区间洪水汇入后的黑龙江干流洪水叠加演化规律。

(3) 目前高寒地区的河道防护型式多样,但由于黑龙江河道演变相关成果较少,同时又受到高寒条件的约束,导致河道治理程度和灾害防治水平滞后。基于我国侧黑龙江干流不是单一河型,上段易受冰排撞击,中、下段洪涝灾害频发,建议选取典型河段进行分段研究,同时基于模型试验、数值模拟及已建工程实例的相互印证,归纳出适合于黑龙江不同典型河段自身特点的防洪安全与岛屿稳定综合治理技术。同时应该加强中俄合作,资源共享,共同推进中俄界河的河道整治。

(4) 在上述研究和工程实践的基础上,可以通过模拟和分析不同河段典型洪水演变规律及特点,结合历史长系列的气象和水文资料以及未来气候变化情景,预测未来黑龙江复杂河道洪水的演变趋势和规律。根据我国新时代生态文明建设、国土安全和跨界河流防洪安全的需要,对重点典型河段提出综合治理方案和措施,以稳定岸滩岛屿、保障防洪安全。

参考文献:

[1] 赵锡山. 俄罗斯结雅水库、布列亚水库对黑龙江干流洪水影响程度分析[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2015.

[2] 廖厚初,刘文斌,潘华盛,等. 2013 年黑龙江中游暴雨洪水分析[J]. 黑龙江水利,2015,1(6):47 -54.

[3] 沈铭晖,史红玲,郭庆超,等. 黑龙江卡伦山以上河段水沙特性及造床流量研究[J]. 泥沙研究,2021,46(4):21 -27.

[4] 刘梅君,刘竹君,郭 君. 黑龙江干流右岸冲刷坍岸原因分析及治理措施建议[J]. 黑龙江水利科技,2001(3):42 -43.

[5] 冷 莉,刘加海,刘心岩. 黑龙江干流中俄界河中游段汊道鸟屿主流变动分析[J]. 水利科技与经济,2002,8(1):12 -14.

[6] 李鹏飞,张 勇,李 俊,等. 黑龙江寒区河道防护型式综述[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(11):51 -53.

[7] 赵思远,郝振纯,刘文斌. 不同水位预报方法在黑龙江干流的应用研究[J]. 中国农村水利水电,2016(3):47 -51.

[8] 王志超,付兴龙,张立刚,等. 走航式 ADCP 在黑龙江干流中游测流中的应用[J]. 东北水利水电,2018,36(6):29 +36.

[9] 刘心岩,王 南,王洪波. 塔河县护岸工程规划布置综述[J]. 黑龙江水利科技,2004(1):60.

[10] 宗 原,王 智,王美懿,等. 黑龙江干流典型河段防护工程效果分析[J]. 东北水利水电,2015,33(8):65 -66.

[11] 潘世兵,李 琳,路京选,等. 黑龙江干流典型江段河道演变趋势预测模型[C]//中国水利学会. 中国水利学会 2007 学术年会人类活动与河口分会场论文集. 北京:水利水电出版社,2007.

[12] 戴春胜. 黑龙江干流抚远江段江道整治工程数学模型分析研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2003.

[13] 冷 莉,刘加海,刘心岩. 黑龙江干流上中游段河床稳定性评价[J]. 黑龙江水利科技,2002(1):58 -59.

[14] 王志兴,郭志学,陈 刚,等. 黑龙江干流松花江汇口江段三维数值模拟研究[J]. 水利水电技术,2008,39(3):1 -3.

[15] 曹修玉,王荣臣. 黑河市黑龙江塌岸的成因及对策[J]. 黑龙江水利科技,2012,40(3):326 -327.

[16] 刘志秋,袁春梅,邓宝昌. 黑龙江干流嘉荫县雪水温江段演变分析[J]. 黑龙江水利科技,2009,37(3):87.

[17] 卜汉臣. 黑龙江干流界河段已建防护工程存在问题分析[J]. 水利科技与经济,2006,12(9):616 -617.

[18] 刘 慧,张幸农,陈长英,等. 抚远水道碍航浅滩特性及成因分析[J]. 水利水电技术,2011,42(11):26 -29.

[19] 卢玉海,黄 海,关见朝,等. 黑龙江抚远水道河床演变数学模型计算分析[J]. 泥沙研究,2021,46(6):30 -36 +72.

[20] 李 强,王震宇,张轶辉,等. 滨北线松花江公铁两用桥改建工程模型试验研究[J]. 水利科技与经济,2012,18(10):32 -37.

[21] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 松花江干流河道演变与维持河道稳定的需水量研究[J]. 水利学报,2007,38(4):473 -480.

[22] 周光涛. 基于松花江干流河道水沙二相性及演变规律[J]. 黑龙江水利科技,2016,44(4):89 - 91.
[23] 刘琦峰. 松花江干流泥沙颗粒特性分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
[24] 宋小燕. 松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D]. 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.
[25] 隋高阳,于 莉,隋栋梁,等. 松花江水沙变化态势与影响因素[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(5):819 - 824.
[26] 张幸农,陈长英,假冬冬. 松花江干流水沙变化与河型特征分析[J]. 泥沙研究,2021,46(6):37 - 43.
[27] 丁昌春,张 磊,郑广智,等. 松花江哈尔滨河段水沙运动数学模型分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):157 - 165.
[28] 闻 雅. 乌苏里江 - 鸭绿江口段界河变迁遥感研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
[29] 周春旭. 黑龙江省河道防护类型及优化模式研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
[30] 李贵勤. 乌苏里江、松阿察河国土防护工程建设的必要性分析[J]. 黑龙江水利科技,2011,39(3):263.
[31] 孟令辉,董玉森,陈伟涛,等. 东北界河河岸稳定性评价:以乌苏里江饶河段为例[J]. 地质科技情报,2015,34(6):214 - 220.
[32] 牟金玲,狄 娟. 黑龙江干流中上游段水文特性[J]. 黑龙江水利科技,2007,35(2):101 - 102.
[33] 陆志华,夏自强,于岚岚,等. 黑龙江中上游径流特征分析[J]. 水电能源科学,2012,30(6):20 - 23.
[34] 刘宇航,张凤德,巩宪春. 2013 年黑龙江全流域大洪水降雨分析[J]. 东北水利水电,2015,33(9):43 - 44 + 55.
[35] 袁嘉琪. 黑龙江干流下游暴雨洪水分析[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2018.
[36] 李成振,孙万光,范宝山,等. 黑龙江干支流洪水叠加与演进规律[J]. 水电能源科学,2021,39(8):81 - 84 + 106.
[37] 冷 栋,才莉莉. 国内外防洪措施的探讨[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(6):41 - 43.
[38] 曹 越,李 杰,李 洋. 黑龙江干流水面线计算方法及问题浅析[J]. 水利科技与经济,2014,20(3):94 - 95.
[39] 刘阳明,王化鑫,唐永美,等. 卡伦山水文站防汛特征水位修订分析[J]. 东北水利水电,2014,32(12):5 + 43.
[40] 郭立峰,殷世平,许佳琦,等. 基于 FY - 3A/MERSI 的 2013 年夏秋间松花江和黑龙江干流洪水遥感监测分析[J]. 自然灾害学报,2015,24(5):75 - 82.
[41] 刘 清,吴君峰,王 浩,等. 基于 Google Earth Engine 云平台的黑龙江流域长时序常年和季节性水面提取及变化分析[J]. 环境工程,2021,39(1):80 - 88.
[42] 假冬冬,杨 俊,陈长英,等. 中国北方季节性冰冻河流岸滩崩塌数值模拟——以松花江为例[J]. 水科学进展,2021,32(5):717 - 726.
[43] 刘心岩,魏延久,王 南. 黑龙江干流国土防护工程设计[J]. 黑龙江水利科技,2003(4):15 - 17.
[44] 冷 莉. 论国境界河黑龙江干流国土防护的必要性[J]. 黑龙江水利科技,2005,33(1):69 - 70.
[45] 张 勇,李鹏飞,李 俊,等. 黑龙江上游冬季气温变化规律及冰期过程研究[J]. 人民黄河,2021,43(S2):98 - 100.
[46] 袁 莉. 堤防填筑冬季备料方案[J]. 黑龙江水利科技,2015,43(7):78 - 79.
[47] 王黑铁,王成才,葛素梅. 黑龙江干流国境界河国土防护护岸工程结构型式选择[J]. 黑龙江水利科技,2003(3):40.
[48] 李子晗. 高水位长期浸泡堤防工程多工况试验及数值模拟计算研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2018.
[49] 王 兵. 堤防堵口水力特性数值模拟与抢险技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.
[50] 孙佳胜. 黑龙江干流同仁段江岸坍塌原因分析[J]. 黑龙江水利科技,2006,34(5):67.
[51] 刘加海,刘心岩,冷 莉. 黑龙江干流低滩切割分析及防护工程布置[J]. 黑龙江水利科技,2002(2):50.

(上接第 137 页)

[19] 李 靖,张金柱,王 晓. 20 世纪 70 年代淤地坝水毁灾害原因分析[J]. 中国水利,2003(17):55 - 56 + 32.
[20] 时芳欣,王志慧,齐 亮,等. 2017 年绥德“7·26”暴雨重现期分析[J]. 人民黄河,2018,40(7):11 - 14.
[21] 刘晓燕,高云飞,王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河,2017,39(4):1 - 5 + 10.
[22] 安全法学. 生产安全事故报告和调查处理条例[J]. 林业劳动安全,2007,26(2):3 - 6.
[23] LI Lu, SHI Zhihua, YIN Wei, et al. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou Reservoir area, China[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23): 3439 - 3447.
[24] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报,2001,16(4):311 - 314.
[25] 元云丽. 基于模糊层次分析法(FAHP)的建设工程项目风险管理研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
[26] 杨 瑞,李子龙,王 丹,等. 黄土高原小流域淤地坝系安全评价[J]. 延安大学学报(自然科学版),2018,37(1):41 - 45.
[27] 马 瑞,张 富,周 波,等. 甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评价模型[J]. 水土保持通报,2021,41(4):139 - 144.