

山洪沟防洪工程设计与实践研究 -- 以皖南地区山洪沟治理为例

彭超越¹ 张嘉成²

1. 广德市水利事业发展中心, 安徽 宣城 242200

2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司, 上海 201900

[摘要] 山洪沟灾害是威胁我国山区城镇与乡村安全的主要自然灾害类型, 其防治工作兼具紧迫性与复杂性。本文以安徽省广德市白马河山洪沟为典型范例, 系统构建并实践了一套集“水文地质精准评估、工程措施差异化设计、生态友好型材料应用、施工运维全过程优化及综合效益科学评价”于一体的综合治理技术体系。研究通过高精度水文分析(结合“84 办法”与历史洪水调查)、精细化地质勘察、多方案工程比选及 MIKE11 水动力模拟, 确立了以“护岸固脚、清淤畅流、生态优先”为核心的治理方案。工程措施包括清淤疏浚 6.08 km (清淤量 4.48 万 m³)、差异化新建护岸 5.31 km (涵盖格宾石笼、浆砌石与钢筋混凝土三种型式)。数值模拟结果表明, 工程实施后河道 10 年一遇设计洪水位平均降低 0.15 m, 最大降幅达 0.52 m, 行洪能力显著提升。基于极限平衡法的稳定性计算与局部冲刷深度分析验证了所有护岸结构的安全可靠性(抗滑安全系数 $K_c \geq 1.29$, 抗倾安全系数 $K_0 \geq 2.53$)。全生命周期经济评价显示, 项目经济内部收益率(EIRR)为 8.4%, 效益费用比(EBCR)达 1.25, 具有显著的经济合理性。本研究不仅为白马河提供了直接的技术解决方案, 更旨在形成一套可复制、可推广的南方丘陵区山洪沟系统治理方法论, 为提升区域洪灾韧性及推进水生态文明建设提供关键技术支持与实践案例。

[关键词] 山洪沟; 防洪治理; 护岸设计; 水文分析; MIKE11 模型

DOI: 10.64635/ja.2026.1510

中图分类号: TV87

文献标识码: A

Research on the Design and Practice of Flood Control Projects for Mountain Torrent Gullies: A Case Study of Mountain Torrent Gully Treatment in Southern Anhui

Peng Chaoyue¹, Zhang Jiayu²

1. Guangde Water Conservancy Development Center, Xuancheng, Anhui 242200, China

2. Shanghai Branch of Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai 201900, China

Abstract: Mountain torrent gully disasters are a major type of natural disaster threatening the safety of towns and villages in mountainous areas of China, and their prevention and control are both urgent and complex. Taking the Baima River mountain torrent gully in Guangde City, Anhui Province as a typical case, this paper systematically constructs and applies a comprehensive treatment technical system integrating accurate hydrogeological assessment, differentiated design of engineering measures, application of eco-friendly materials, whole-process optimization of construction and operation and maintenance, and scientific evaluation of comprehensive benefits. Through high-precision hydrological analysis combining the “84 Method” and historical flood investigation, refined geological investigation, multi-scheme engineering comparison, and MIKE11 hydrodynamic simulation, a treatment scheme centered on “bank protection and foundation reinforcement, dredging for smooth flow, and ecological priority” is established. The engineering measures include dredging of 6.08 km, with a dredging volume of 44,800 m³, and differentiated construction of 5.31 km of new revetments, covering three structural forms: gabion cages, mortared masonry, and reinforced concrete. The numerical simulation results show that, after project implementation, the design flood level under a 10-year return period is reduced by an average of 0.15 m, with a maximum reduction of 0.52 m, indicating a significant improvement in flood discharge capacity. Stability calculation based on the limit equilibrium method and local scour depth analysis verify the safety and reliability of all revetment structures, with an anti-sliding safety coefficient $K_c \geq 1.29$ and an anti-overturning safety coefficient $K_0 \geq 2.53$. The whole-life-cycle economic evaluation shows that the project has an economic internal rate of return (EIRR) of 8.4% and an economic benefit-cost ratio (EBCR) of 1.25, demonstrating clear economic rationality. This study not only provides a direct technical solution for the Baima River, but also aims to form a replicable and promotable methodology for systematic mountain torrent

gully treatment in hilly areas of southern China, providing key technical support and a practical case for improving regional flood disaster resilience and promoting water ecological civilization construction.

Keywords: mountain torrent gully; flood control treatment; revetment design; hydrological analysis; MIKE11 model

引言

山洪灾害因其突发性强、成灾快、破坏力大,已成为我国山丘区最具威胁的自然灾害之一^[1-2]。其灾害链效应往往诱发滑坡、泥石流等次生灾害,进一步放大灾情损失^[3]。据统计,我国山洪灾害造成的人员伤亡占洪涝灾害总伤亡人数的比例高达 70% 以上^[4],凸显了其防治工作的极端重要性。安徽省广德市地处皖南山区与沿江平原过渡带,地形起伏大,地质条件复杂,且受梅雨锋面和台风影响,暴雨集中、强度大,是安徽省山洪灾害的重点防治区^[5]。白马河作为广德市杨滩镇境内的主要山洪沟,流域内河道比降大(17.9%),汇流速度快,山洪特性显著。历史灾情记录表明,该流域在 2009 年“莫拉克”台风、2012 年“海葵”台风、2016 年区域性特大暴雨及 2019 年“利奇马”台风期间,均暴发了严重的山洪灾害,导致了大规模的岸坡坍塌、农田淹没、交通中断及水利基础设施损毁,累计直接经济损失超过千万元,对沿岸五合村、白马村和燎琳村共 7084 人的生命财产安全与社会经济稳定构成了持续且严峻的威胁。

当前,国内在山洪灾害防治领域的研究已取得长足进展,但多数研究或侧重于非工程措施如预警系统模型的构建^[6],或聚焦于单一工程措施(如某类护岸结构)的效能分析^[7]。然而,从流域系统整体性出发,将水文水力计算、工程地质评价、多目标工程措施比选、生态环境影响减缓、施工组织优化以及全生命周期经济评价进行有机整合的系统性治理工程设计实践总结尚显不足。特别是对于像白马河这类兼具保护对象重要、地质条件敏感、生态要求日益提高等特征的典型山洪沟,缺乏一套完整、可操作的技术指南与实践范例。

因此,本文以《广德市白马河山洪沟防洪治理工程初步设计报告》为蓝本,旨在通过一个完整的工程案例,深入剖析山洪沟防洪治理从问题识别、方案论证到具体设计的全链条关键技术环节。重点探讨:(1)如何综合利用水文图集与实地调查数据提高设计洪水的精度;(2)如何基于详实的地质勘察成果进行差异化、精准化的护岸工程设计;(3)如何运用现代水动力模型量化工程措施对行洪能力的影响;(4)如何在保障安全的前提下兼顾生态效益与经济效益。

本研究旨在为我国南方丘陵区乃至全国类似条件的山洪沟治理工程,提供一套科学、系统、实用的技术范式与宝贵的实践经验。

1 研究区概况与问题诊断

1.1 流域自然地理与社会经济概况

白马河水系水阳江流域郎川河水系桐河上游段,地理坐标介于东经 119° 02′ ~ 119° 41′ 与北纬 30° 37′ ~ 31° 12′ 之间。流域呈狭长形,总面积 65.9 km²,主河道长 12.46 km,平均比降高达 17.9%,属典型的山区性河流。流域内地貌以低山丘陵为主,南部为低山区,北部逐渐过渡为丘陵岗地,整体地势南高北低。气候类型属北亚热带湿润季风气候,四季分明,雨热同季。据广德市气象站资料,多年平均降水量为 1328.1 mm,但年际变率大(最丰年 1977.0 mm,最枯年 775.9 mm),且年内分配极不均匀,汛期(5~8 月)降雨量占全年 55% 以上,暴雨是诱发山洪的直接原因。

本次治理工程直接保护范围涉及杨滩镇南部的五合村、白马村和燎琳村三个行政村。区域内总保护人口 7084 人,保护耕地 724 亩,工矿企业 4 家。区域经济以第一产业为主,盛产毛竹、茶叶和板栗,是著名的“中国竹子之乡”。防洪能力的提升对于保障当地民众生命财产安全、维护特色农业经济稳定、促进乡村振兴战略实施具有至关重要的意义。

1.2 河道现状及多维度问题诊断

通过联合采用现场实地勘察、高精度地形测量、历史影像对比分析及社区访谈等多种手段,对白马河现状进行了全面“体检”,诊断出以下核心问题:

河道功能性淤积萎缩:长期的山洪搬运导致大量砂石在河道内淤积,特别是河道转弯、放宽段以及支流河口处,淤积厚度平均达 0.5 m,局部超过 1.0 m。这使得主河槽过流断面严重缩窄,河床糙率增加,泄洪能力大幅下降,形成“小洪水、高水位”的不利局面。

岸坡结构性失稳与功能性退化:河道两岸岸坡主要由粉质黏土和卵石层构成,抗冲刷能力普遍较差。在洪水顶冲段(凹岸),土质边坡发生持续性坍塌后退(图 1a);早期建设的部分浆砌石挡墙因基础掏空、砂浆老化等原因,出现大面积水毁、开裂和倾覆(图 1b),防护功能基本丧失。



a) 岸坡坍塌段



b) 挡墙水毁段

图 1 白马河典型岸坡病害现场照片

防洪体系标准不匹配：根据《广德市白马河山洪灾害调查评价报告》成果，结合本次水文计算复核，现状河道大部分村庄段的实际防洪能力低于 10 年一遇，与《防洪标准》（GB50201-2014）中对人口集中村庄的防护要求存在差距，防洪安全风险突出。

生态与服务功能缺失：现状河道治理意识以“硬防护”为主，生态功能考虑不足。同时，缺乏方便居民亲水活动的下河台阶等便民设施，河道的综合服务功能未能充分发挥。

2 治理工程设计理论与方法

2.1 水文分析计算：多源数据融合与复核

设计暴雨是洪水计算的基础。本研究采用两种方法并行以相互验证：一是基于流域内柏垫、杨滩、凤凰山等长系列雨量站实测资料进行频率分析；二是依据《安徽省暴雨参数等值线图》（“84 办法”）进行查算。经综合比较，考虑到“等值线图”成果采用的暴雨站点多，并经综合分析与面上平衡，能更好地反映暴雨统计参数的地区分布规律，最终采用“84 办法”查算成果作为设计面雨量输入。对于 1 小时和 24 小时设计暴雨，分别根据流域面积（65.9 km²）采用 0.96 和 0.97 的点面关系系数进行折算。

设计洪水计算采用安徽省水利部门认可的“84 办法”中的综合瞬时单位线法。该方法考虑了流域的汇流特性，适用于本研究区的中小流域。为保证设计洪水成果，特别是洪峰流量的合理性，我们引入《广德市白马河山洪灾害调查评价报告》中杨家冲断面的历史洪水调查成果（洪峰流量 40.3 m³/s，重现期约 9 年）进行严格的复核。复核结果显示，本次计算杨家冲断面 10 年一遇洪峰流量为 43.2 m³/s，与调查值极为接近，洪峰模数亦处于地区经验值合理范围内，从而从多角度验证了本次设计洪水计算方法和成果的可

靠性。

2.2 工程设计标准与安全控制指标

工程等别与建筑物级别的确是设计的前提。根据《防洪标准》（GB50201-2014）及《山洪沟防洪治理工程技术规范》（SL/T778-2019），考虑到保护对象为人口在 5000~10000 人的村庄，确定其防洪标准为 10 年一遇。相应的，治理工程等别确定为 V 等，其主要永久性水工建筑物（护岸）级别为 5 级，临时性建筑物（如施工围堰）级别也为 5 级。

在结构安全控制方面，严格遵循《堤防工程设计规范》（GB50286-2013）和《水工挡土墙设计规范》（SL379-2007）。对于 5 级建筑物，在正常运用条件下，抗滑稳定安全系数允许值土基上为 1.20，抗倾覆稳定安全系数允许值为 1.40。这些指标是后续护岸结构稳定性计算的强制性控制标准。

2.3 水面线计算：MIKE11 模型的应用与效果评估

为精确评估工程措施对河道行洪能力的影响，本研究采用丹麦水力学研究所（DHI）开发的 MIKE11 软件构建了一维水动力模型。模型上边界为各支流及区间设计洪峰流量过程线，下边界为桐河与濶河汇合口处由曼宁公式推求的水位-流量关系。河道糙率系数根据河道植被、断面形态及床质组成，综合取值 0.035。

模型分别对工程实施前（现状地形）和实施后（清淤疏浚后设计断面）两种情景进行模拟计算。计算结果清晰地量化了清淤疏浚工程的效益：治理后，各断面 10 年一遇设计洪水位较治理前普遍下降，平均降幅为 0.15 m。其中，在淤积最为严重的 BM 5+262 断面，水位降幅最大，达到 0.52 m。这一成果不仅验证了清淤方案的有效性，也为后续护岸顶高程的确定提供了直接的设计依据，确保了工程的防洪安全。

3 关键工程措施与技术创新

3.1 清淤疏浚设计：遵循自然与精准施策

清淤疏浚设计秉持“尊重自然、因势利导”的原则。基本维持现状河槽中心线与平面形态不变，仅对局部急弯段进行适当“抹角”或“切滩”以改善流态，避免大规模裁弯取直对生态环境造成破坏。为防止产生新的险工，设计明确规定：对迎流顶冲段，预留不少于 5m 宽的自然滩地；两岸有护坡或陡坎的，距坎脚 3 ~ 5m 范围内不予清理；为保护既有桥梁安全，桥墩周边 10m 范围内禁止疏浚，并采用缓于 1:2 的疏浚边坡。疏浚控制断面根据河道现状口宽，设计底宽为 5~15m，边坡不陡于 1:2。经测算，总清淤河长 6.08 km，总清淤方量 4.48 万 m³。

3.2 护岸工程型式比选与差异化设计

结合比选结果与广德市当地经验，最终针对白马河不同岸段的特点，创新性地采用了“一种主导，多种配合”的差异化护岸设计方案：

A 型（格宾石笼护岸）：主要应用于河道顶冲段以及对生态要求较高的农田段。格宾石笼由低碳钢丝编织成网箱，内填石块，具有极佳的透水性、柔韧性和适应地基变形能力，同时石缝间可自然淤积泥土并生长植物，生态效益显著。设计采用 3 层直立结构，每层厚 1.0m，底层宽 2.0m 以增强稳定性。

B 型（浆砌石挡墙）：主要用于现状已坍塌或水毁的浆砌石挡墙的修复段。该型式结构坚固，就地取材方便，造价经济。设计采用梯形断面，临水侧坡比 1:0.2，背水侧 1:0.3，墙顶宽 0.4m，基础采用 C20 素混凝土底板。

C 型（钢筋砼挡墙）：应用于保护对象极为重要、场地空间受限的重点村庄段和紧邻民房的岸段。钢筋混凝土结构具有最高的结构强度和整体性，能提供最可靠的安全保障。设计为悬臂式挡墙，墙身与底板均采用 C25 钢筋混凝土。

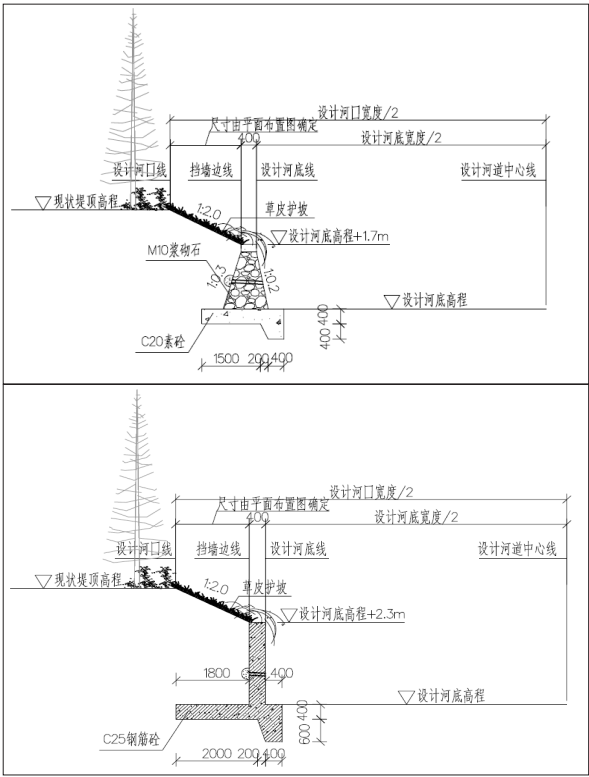


图 2 三种护岸型式设计典型断面图

全段共计新建护岸 5.31km，其中 A 型护岸 1062m，B 型护岸 3398m，C 型护岸 847m，实现了安全性与经济性的最优配置。

3.3 结构稳定性与局部冲刷深度计算分析

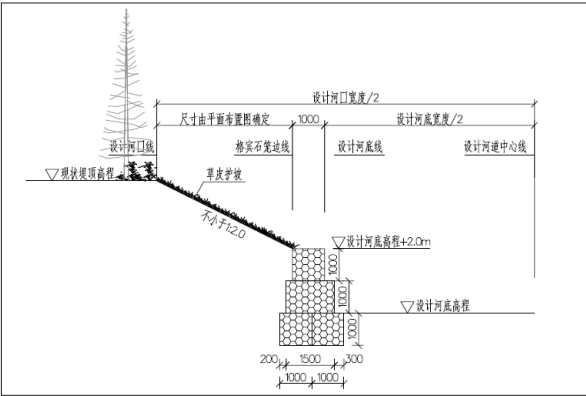
为确保护岸结构在各种不利工况下的安全，本研究选取了各型护岸的典型断面，采用岩土工程专业软件（如理正系列）进行严格的稳定性验算。计算主要考虑竣工期（未形成稳定渗流）和正常运用期（稳定渗流）两种工况。

详细的计算结果表明，所有护岸结构在最不利荷载组合下，其抗滑、抗倾覆安全系数均远大于规范规定的允许最小值，且基底应力均小于地基承载力特征值，地基承载力满足要求。同时，计算的局部冲刷深度为护岸基础埋深的设计提供了科学依据（如设计埋深 1.0m 大于计算冲刷深度 0.31m），确保了结构的“脚下安全”。

4 施工组织、水土保持与环境保护

4.1 精细化施工组织设计

考虑到山洪沟治理的线性工程特点，施工组织设计强调“分段实施、导流先行、土方平衡”。施工期严格控制在非汛期（11月至次年4月），总工期6个月。导流标准采用 5 年一遇枯水期洪水，通过分段构筑土石围堰创造干地施工条件。通过精细的土方平衡计算，



工程开挖的 9.62 万 m^3 土方中, 4.11 万 m^3 用于回填, 4.63 万 m^3 运至指定弃土场, 实现了资源的最大化利用和弃渣的最小化。

4.2 全过程水土保持与环境保护策略

秉持“绿水青山就是金山银山”的理念, 制定了贯穿工程建设全过程的水保环保方案。水土流失防治责任范围 7.6 hm^2 。主要措施包括: (1) 工程措施: 对主体工程区、弃土场、施工便道等区域的表土进行剥离 (总量 4680 m^3) 和后期回覆, 用于植被恢复。(2) 临时措施: 在施工期间, 在堆土场周边设置填土草包拦挡和无纺布覆盖, 在各施工区边界开挖临时排水沟和沉沙池 (共 10 座), 有效控制施工期间的水土流失。(3) 植物措施: 施工结束后, 对临时占地进行土地整治并撒播草种, 恢复植被。本项目专项环保投资 14.42 万元, 水保投资 22.18 万元, 确保了工程建设与生态环境保护的和谐统一。

5 工程投资与全生命周期效益分析

工程静态总投资为 1683.04 万元。投资构成包括: 建筑工程费 1214.16 万元, 临时工程费 124.05 万元, 独立费用 192.35 万元, 预备费 76.53 万元, 以及建设征地移民补偿、环境保护、水土保持专项投资。

经济效益评价采用“有无工程对比法”和“投入-产出”分析框架。计算期取 30 年, 社会折现率采用 8%。经济效益主要为防洪减灾效益, 通过调查分析历史洪灾损失, 并考虑地区经济增长率, 预测工程实施后年均减少的洪灾损失。费用包括初设投资和年运行费 (按 2 万元/公里·年计)。经计算, 项目经济内部收益率 (EIRR) 为 8.4%, 大于社会折现率; 经济净现值 (ENPV) 为 2045 万元 (>0); 经济效益费用比 (EBCR) 为 1.25 (>1)。这三项核心指标均明确显示, 该工程在经济上是完全合理且可行的。

此外, 工程的实施还带来了巨大的社会效益 (保障人民生命安全、维护社会稳定、改善居民生活环境) 和生态效益 (通过生态护岸和植被恢复, 改善了河道生态环境, 提升了生物多样性), 这些隐性效益虽难以完全货币化, 但其价值不容忽视。

6 结论与展望

本研究通过对广德市白马河山洪沟防洪治理工程的系统性设计与实践, 得出以下主要结论与展望:

系统性综合治理是根本出路: 山洪沟治理是一项复杂的系统工程, 必须打破专业壁垒, 将水文、地质、工程结构、生态环境、施工组织和经济评价等多个学科知识深度融合。基于多源信息 (图集、实测、调查)

的设计洪水复核, 是提高工程设计精度和可靠性的关键前提。

差异化与精准化设计是技术核心: 摒弃“一刀切”的治理模式, 根据岸坡的地质条件、水力特性、保护对象的重要性及生态景观需求, 精准选用格宾石笼、浆砌石和钢筋砼等差异化护岸型式, 是实现工程安全、经济、生态多重目标优化的核心技术路径。详尽的稳定性与冲刷计算是确保工程长效安全的技术保障。

清淤疏浚是快速恢复行洪能力的有效手段: 利用 MIKE11 等现代水动力模型可以精准量化清淤工程对降低洪水位的效应。白马河的实践表明, 针对性的清淤能显著提升河道行洪能力, 是解决因淤积导致防洪标准降低问题的直接且有效的工程措施。

工程综合效益显著, 具备推广价值: 该工程不仅将重点保护对象的防洪标准提升至 10 年一遇, 从根本上保障了人民生命安全, 其良好的经济指标 (EIRR=8.4%, EBCR=1.25) 也证明了公益性水利基础设施投入所能产生的可观社会经济回报。所形成的“调查-诊断-设计-模拟-验证-管理”技术体系, 对南方丘陵区山洪沟治理具有重要的推广价值。

展望未来, 山洪沟治理技术将向着更加智慧化、生态化的方向发展。建议下一步:

深化生态技术应用: 进一步研究和推广高性能生态混凝土、植物纤维毯等新型生态材料与结构, 提升护岸的生态功能和景观效果。

构建智慧管控平台: 将治理工程与物联网、大数据、人工智能技术深度融合, 建立集雨情、水情、工情实时监测、洪水智能预报预警、工程调度运维于一体的“智慧山洪”综合管控平台, 实现从被动防御到主动预警、精准调控的跨越。

健全长效管护机制: 探索建立“政府主导、社会参与、市场运作”的工程长效管护机制, 确保工程能够持续发挥效益。

通过“工程+生态+智慧”三管齐下, 最终构建起一个安全、绿色、智能、高效的现代化山洪灾害综合防治体系, 为区域高质量发展提供坚实的水安全保障。

【参考文献】

- [1] 刘志雨, 杨大文, 胡健伟. 中国山洪灾害预警技术研究进展 [J]. 水利学报, 2018, 49(1): 1-12.
- [2] 张红萍, 刘昌军, 李昌志, 等. 山洪灾害防治理论与技术研究进展 [J]. 水科学进展, 2020,

- 31(2):297-310.
- [3] 陈仁明, 魏晓林. 山洪地质灾害链效应与风险防控研究综述 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1124-1133.
- [4] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 全国山洪灾害防治规划 [R]. 北京, 2006.
- [5] 安徽省水利厅. 安徽省水阳江、青弋江、漳河流域防洪规划 (2001 年修订) [R]. 合肥, 2001.
- [6] 王协康, 周苏芬, 刘兴年. 基于物联网的山洪灾害监测预警系统构建 [J]. 山地学报, 2019, 37(4): 589-597.
- [7] 袁辉, 陈仁明. 生态格网结构在山洪沟治理中的应用与稳定性研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5): 120-124.
- [8] SL/T778-2019, 山洪沟防洪治理工程技术规范 [S].
- [9] GB50201-2014, 防洪标准 [S].
- [10] GB50286-2013, 堤防工程设计规范 [S].
- [11] DHI. MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels User Guide[M]. Danish Hydraulic Institute, 2017.
- 作者简介: 彭超越 (1995.11—), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 安徽省宣城市, 学历: 本科, 职称: 水利水电工程助理工程师, 研究方向: 水利水电工程管理; 张嘉彧 (1991.10—), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 吉林省松原市, 学历: 硕士研究生, 职称: 水利水电工程工程师, 研究方向: 河道治理与水工结构。