

汉江兴隆水利枢纽下游近坝河段枯水位下降及成因分析^{*}

陈柯兵¹,高玉磊^{2**},朱玲玲¹,由星莹³,樊咏阳⁴,邓乐乐⁵

(1:长江水利委员会水文局,武汉 430010)

(2:中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心,宜昌 443133)

(3:湖北省汉江兴隆水利枢纽管理局,武汉 430062)

(4:长江勘测规划设计研究有限责任公司,武汉 430014)

(5:武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,武汉 430072)

摘要: 汉江兴隆水利枢纽运行后,坝下游近坝段枯水位较建坝前下降明显,500~800 m³/s 流量下,2021 年较运行前坝下水位累计下降 2.47~2.55 m,对工程安全及效益发挥带来不利影响。基于水文、断面、水下地形等观测资料,对枯水位下降的原因进行深入剖析。结果表明,兴隆水利枢纽的拦沙作用有限,皇庄以上沙量减少是兴隆以下河床冲刷加剧的重要原因,高水调平导致的年内枯水上滩几率下降和航道整治护滩工程是强冲刷过程中“滩淤槽冲”的核心因素。坝下游河段枯水河槽冲刷及汉口最低水位下降是造成兴隆近坝段枯水位下降的直接原因。随机森林算法分析显示,对兴隆坝下水位变化影响最大的因素为兴隆站输沙率的锐减。此外,航道整治工程、河床边界条件对枯水位下降也有十分重要的驱动作用。兴隆坝址及下游河段的河床组成偏细,2012—2022 年虽然河床剧烈冲刷,但床沙组成没有出现粗化的现象,预计河床仍将继续冲刷下切,枯水位尚未达到稳定状态。

关键词: 汉江;兴隆水利枢纽;河床冲刷;枯水位下降;随机森林

Analysis of the low water level decline and its causes in the downstream section of Hanjiang River Xinglong Water Control Project near the dam^{*}

Chen Kebing¹, Gao Yulei^{2**}, Zhu Lingling¹, You Xingying³, Fan Yongyang⁴ & Deng Lele⁵

(1: Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

(2: River Basin Hub Operation Management Center of China Three Gorges Group Co., Ltd., Yichang 443133, P.R.China)

(3: Hubei Hanjiang Xinglong Hydro-junction Administration, Wuhan 430062, P.R.China)

(4: Changjiang Institute of Survey, Planning Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, P.R.China)

(5: State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

Abstract: After the operation of the Xinglong Water Control Project at Hanjiang River, the low water level near the downstream of the dam has significantly decreased compared to that before the construction of the dam. Under a flow rate of 500–800 m³/s, the cumulative water level under the dam has decreased by 2.47–2.55 m in 2021 compared to that before the operation. Such water level decrease had adverse effects on the safety and efficiency of the Hydro-junction. Based on the observation data of hydrology, cross section and underwater topography, the causes of low water level decline were analyzed. The results showed a limited sediment retention of the Xinglong Water Control Project. Reduction of sediment flux through Huangzhuang was an important factor enhancing riverbed erosion below Xinglong. The decrease in the probability of dry water reaching the beach during the year caused by high water level regulation, the channel regulation and protection engineering were critical factors of “beach sedimentation and channel erosion” in the process of strong erosion. The direct reasons for the decrease of dry water level in the Xinglong near dam section were the erosion of the low water channel downstream of the dam and the decrease in the lowest water level in Hankou. The random forest

* 2023-10-19 收稿;2023-12-14 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC3209502)、湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202327)和国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240206)联合资助。

** 通信作者;E-mail:gao_yulei@ctg.com.cn。

algorithm analysis showed that the most critical factor affecting the changes in water level under Xinglong Dam was the sharp decrease of sediment flux at Xinglong Station. In addition, the waterway regulation project and the boundary conditions of the riverbed also played a critical role in the decrease of low water level. The riverbed composition at the Xinglong Dam site and downstream reaches was relatively fine. Although the riverbed was severely eroded from 2012 to 2022, there was no coarsening of the sediment composition. Therefore, it was expected that the riverbed will continue to be eroded and cut down. The low water level has not yet reached a stable state.

Keywords: Hanjiang River; Xinglong Water Control Project; river bed erosion; lowering of low water level; random forest

枯水位是河流研究中的重要参数,在河势变化、通航安全、涉水工程和生态保护等诸多领域都具有重要意义^[1-3]。而河床冲刷和枯水位下降是水利工程对冲积河流最为显著的影响之一,目前,结合河流自身特点,对建坝后水库下游河床冲刷和水位变化的原型观测进行分析,从中归纳发现一般性和特殊性的规律,是提高水位下降变化预测准确性的较为可行的途径^[4]。

长江中下游是举世闻名的大型冲积河流,三峡水库运用后坝下游冲刷和水位变化是三峡工程论证期间关注的重点问题之一^[5]。许多学者基于跟踪观测资料针对坝下河道冲淤调整和水位变化开展了研究,杨云平等^[6]对坝下游床面粗化和非均匀沙沿程恢复规律开展分析;李少希等^[7]以三峡工程为对象,研究坝下游水沙通量及河道演变过程对三峡工程运行的响应关系;朱玲玲等^[8-9]对坝下游荆江河段、洞庭湖、鄱阳湖的泥沙冲淤特征进行研究;唐金武、李玉荣等^[10-11]对坝下游水位变化规律的分析等。此外,我国长江葛洲坝枢纽^[12]、西江长洲枢纽^[13-14]、湘江长沙枢纽^[15]、澧水艳洲枢纽^[16]建设后,下游均出现水位下降现象。

兴隆水利枢纽位于汉江干流河道,其主体建筑物均坐落于深厚粉细砂覆盖层上^[17],2013年4月,兴隆枢纽下闸蓄水后,坝下河床发生冲刷^[18]。早期研究对坝下水位最大降幅预测不充分^[19],枯水位下降带来的危害显著:如兴隆电站机组超过设计水头运行,船闸下闸首槛上水深不足,鱼类洄游通道受阻,甚至危及建筑物稳定安全。

由星莹等前期研究表明^[20],目前近坝主要冲刷坑的平均冲刷深度13.4 m,最大坑深近20 m。与兴隆建坝前的坝址水位流量关系曲线相比,建坝后坝址中、枯水位明显下降,且存在继续下降的趋势。下降成因在于,南水北调中线及补偿工程实施后,汉江中下游水沙条件变异,“清水下泄”导致河床冲刷;枢纽建设致使坝下局部河势调整,深泓摆动频繁、主流线坐弯延长、过水面积及河槽容积增大;局部航道整治工程促进原滩体萎缩、新主槽刷深;引江济汉工程补水增强了中枯期水流冲刷动力等。

这些关于兴隆枢纽的研究^[18-20]均表明,预计未来坝下游河床仍将有继续冲刷下切的可能,并从定性角度分析了影响因素的主次,但在定量分析上有所欠缺。为进一步深入剖析兴隆近坝河段冲刷机理与枯水位下降成因,本文采用时间跨度最为全面的水沙、地形、断面等实测数据,深入分析水沙情势及河道冲淤的时空演变,系统辨识了枯水位变化的主要成因,并基于随机森林算法^[21-23],筛选了可量化的枯水位下降主要影响因子开展分析,为兴隆水利枢纽运行管理与通航、用水安全调控提供技术支撑。

1 汉江中下游水沙情势和河道冲淤变化

1.1 水沙情势变化

丹江口等水库建库后,汉江中下游水沙过程得到了全面的调蓄控制,水沙形势有了很大的改变,汉江中下游洪峰大大削减,流量过程变得较为均匀平缓,枯季流量增大,中水期延长。输沙形势有了很大的改变。主要表现为大量泥沙被拦在库内,坝下基本是清水下泄。尤其是南水北调中线一期、引江济汉等引调水工程运行后,水库调蓄的作用进一步增强,主要表现为洪峰削减调平,年内分配更趋均匀^[24]。

汉江中下游的主要水文站及水利工程分布图,如图1所示。表1统计了汉江中下游各站水沙特征,其中“兴隆水利枢纽蓄水运用、南水北调中线一期、引江济汉等引调水工程运行后”三者的时间节点接近,表中统一篇称为“中线运行后”。蓄水后中线运行前,黄家港站的来水量约占仙桃站的88.6%,来沙量占仙桃站4.1%;中线运行后,黄家港站来水量占仙桃站的比例下降至83.4%,来沙量占仙桃站的比例仅为0.98%。可见,汉江中下游在多个梯级枢纽的重重阻隔下,输沙量锐减,入汇长江干流段的泥沙基本来自于沿程河床的冲刷补给^[25]。

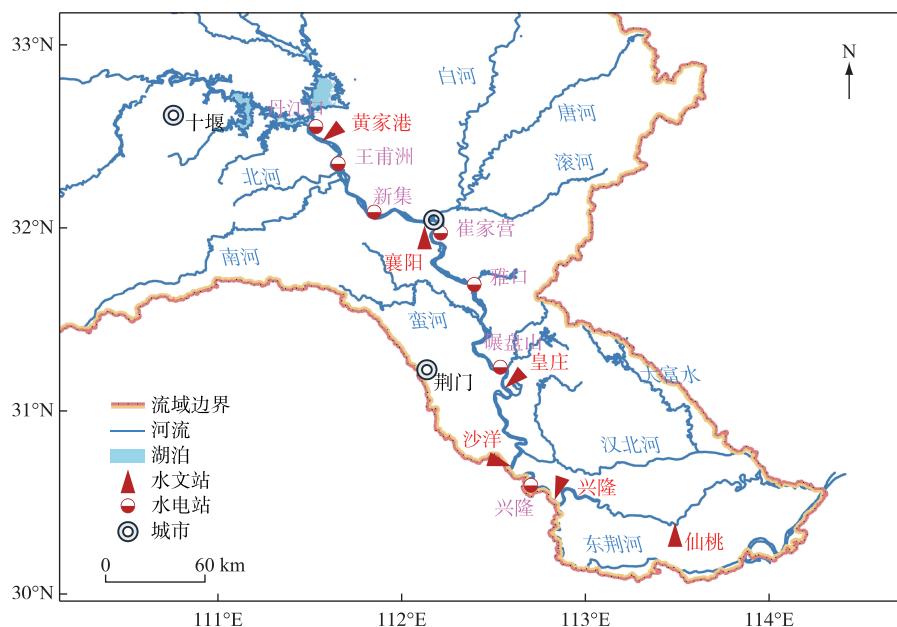


图 1 汉江中下游主要水文站及水利工程分布

Fig.1 Distribution of main hydrological stations and water conservancy projects in the middle and lower reaches of Hanjiang River

表 1 汉江中下游各站水沙特征统计

Tab.1 Statistics on water and sediment characteristics of hydrological stations in the middle and lower reaches of Hanjiang River

站名	时期	多年平均 径流量/亿 m ³	径流量 统计年份	多年平均 输沙量/万 t	输沙量 统计年份
黄家港	建库前	413.0	1954—1959	11308	1955—1959
	滞洪期	412.5	1960—1967	7263	1960—1967
	蓄水后	342.9	1968—2013	81.3 *	1968—2013
	中线运行后	271.0	2014—2022	5.62	2014—2022
皇庄	蓄水后	457.2	1970—2013 **	1389	1974—2013
	中线运行后	370.7	2014—2022	383.2	2014—2022
沙洋(兴隆)	蓄水后(沙洋)	448.8	1973—2013	1399	1980—2013
	中线运行后(兴隆)	374.1	2014—2022	365.1	2014—2022
仙桃	滞洪期	463.4	1960—1967	8956	1963—1967
	蓄水后	387.1	1972—2013	1979	1972—2013
	中线运行后	324.9	2014—2022	570.2	2014—2022

* 缺 1986、1988、1991—1997、1999、2001、2002、2004、2008 年数据；** 缺 1973 年数据。

中线运行前后,皇庄、兴隆水文站的输沙减少幅度基本相当,2014—2022 年相较于 2013 年前多年均值分别减少 1006 万 t 和 1034 万 t, 主要受上游崔家营(2005 年 11 月开工建设,2010 年 8 月建成投用)、雅口(2017 年 2 月开工建设,2023 年 6 月主体工程完工)、碾盘山(2016 年 12 月开工建设,2023 年 6 月首台机组投产)等水库建设运行的影响,一方面河道转为库区,水动力条件减弱,河床冲刷强度下降,对水流泥沙的补给减弱;另一方面枢纽直接拦沙,区间汇入的泥沙被枢纽层层拦截。相反地,皇庄至兴隆段输沙量沿程变化

较小,表明兴隆枢纽的拦沙作用十分有限。

1.2 河道冲淤变化

根据兴隆至仙桃段 1977 年和 1988 年实测地形资料,采用断面法和地形法,共布置 208 个断面,断面间距约为 1.2 km,局部弯道段采用地形法,将 2005 和 2016 年实测地形资料,共布置 115 个断面,断面间距约为 2.1 km,2012 年和 2022 年为固定断面观测资料,采用断面法对兴隆至仙桃河段的平滩河槽、枯水河槽冲淤量进行计算。不同时期兴隆坝址下游至仙桃河段的河床冲淤量沿程分布详见表 2。

表 2 不同时期、不同计算水位下兴隆坝下游至仙桃河段冲淤统计

Tab.2 Statistics of erosion and deposition from Xinglong downstream to Xiantao under different periods and different calculated water levels

河段	统计项目	枯水河槽							平滩河槽						
		计算水位(41.86~22.85 m)							计算水位(44.70~25.86 m)						
		1977	1988	2005	2012	2016	2012	1977	1977	1988	2005	2012	2016	2012	1977
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
兴隆—	冲淤量	-413	-590	-385	-1030	-2317	-3347	-4735	-477	-2569	-900	-1849	-1495	-3344	-7290
泽口	冲淤强度	-1.36	-1.25	-1.99	-9.30	-13.94	-12.08	-3.80	-1.57	-5.46	-4.64	-16.69	-9.00	-12.07	-5.85
泽口—	冲淤量	-646	-878	-97	-196	-1073	-1269	-2890	-743	-1738	-215	-260	-742	-1002	-3698
岳口	冲淤强度	-1.88	-1.66	-0.44	-1.57	-5.73	-4.07	-2.06	-2.16	-3.28	-0.98	-2.08	-3.96	-3.21	-2.63
岳口—	冲淤量	-611	-884	-119	13	-928	-915	-2529	-680	-1220	159	-150	-822	-972	-2713
麻洋	冲淤强度	-1.83	-1.72	-0.56	0.11	-5.10	-3.02	-1.85	-2.04	-2.37	0.75	-1.24	-4.52	-3.21	-1.99
麻洋—	冲淤量	-167	-867	-52	-308	-285	-593	-1679	-66	-1226	-68	-284	-243	-527	-1887
仙桃	冲淤强度	-0.81	-2.71	-0.40	-4.10	-2.53	-3.15	-1.98	-0.32	-3.84	-0.52	-3.78	-2.15	-2.80	-2.23
兴隆—	冲淤量	-1837	-3219	-653	-1521	-4603	-6124	-11833	-1966	-6753	-1024	-2543	-3302	-5845	-15588
仙桃	冲淤强度	-1.55	-1.75	-0.86	-3.52	-7.10	-5.67	-2.43	-1.65	-3.68	-1.35	-5.89	-5.10	-5.41	-3.21

计算水位为国家 1985 高程基准,冲淤量的单位为万 m^3 ,冲淤强度的单位为万 $m^3/(km \cdot a)$,“+”为淤积,“-”为冲刷。

从冲淤计算结果看,兴隆坝址下游至仙桃河段长约 108 km,1977—2022 年河段呈冲刷状态,枯水河槽冲刷 1.183 亿 m^3 ,平滩河槽冲刷 1.559 亿 m^3 ,单位河长年均冲刷强度分别为 2.43 万、3.21 万 $m^3/(km \cdot a)$,枯水河槽冲刷量占平滩河槽冲刷量的 75.9%,以冲槽为主。对比兴隆枢纽修建前后两个时段来看,2005—2012 年河段枯水、平滩河槽分别冲刷 653 万、1024 万 m^3 ,单位河长年均冲刷强度分别为 0.86 万、1.35 万 $m^3/(km \cdot a)$,滩槽均冲;2012—2022 年河段枯水、平滩河槽分别冲刷 6124 万、5845 万 m^3 ,单位河长年均冲刷强度分别为 5.67 万、5.41 万 $m^3/(km \cdot a)$,以枯水河槽冲刷为主,中低滩略有淤积。可见,兴隆及上游一系列的枢纽运行后,坝下游河床冲刷强度增大,且受航道整治护滩工程的影响,中低滩体均保持稳定,促进了枯水河槽的冲刷^[20]。

综合水沙情势、河道冲淤变化分析结果,2014 年开始皇庄、兴隆水文站输沙几乎等幅下降,皇庄上游沙量减少是兴隆以下河床冲刷加剧的重要原因之一,高水调平导致的年内枯水上滩几率下降和航道整治护滩工程是强冲刷过程中“滩淤槽冲”的核心因素。

1.3 枯水期水位变化

图 2 给出了汉江中下游主要水文、水位站点 1960—2022 年间不同时段对应的年内枯水期 1、2、3、4、11 和 12 月平均水位,变化值为 2014—2022 年相对 2001—2013 年的绝对变化幅度。其中泽口、岳口两水位站位于兴隆与仙桃站之间。

1)黄家港站,从平均水位过程来看,丹江口水库建库前其水位年内有明显的丰枯水过程,蓄水后,水位被调平,年内波动性降低。2000 年王甫洲蓄水后因站点位于库区,整体水位升高较大,水位年内变幅较小。南水北调中线一期、引江济汉等引调水工程运行后,因来水减少水位年内变幅进一步降低。

2)皇庄站,从平均水位过程来看,丹江口水库建库前皇庄水位较高,蓄水后,水位被调平,年内波动性降

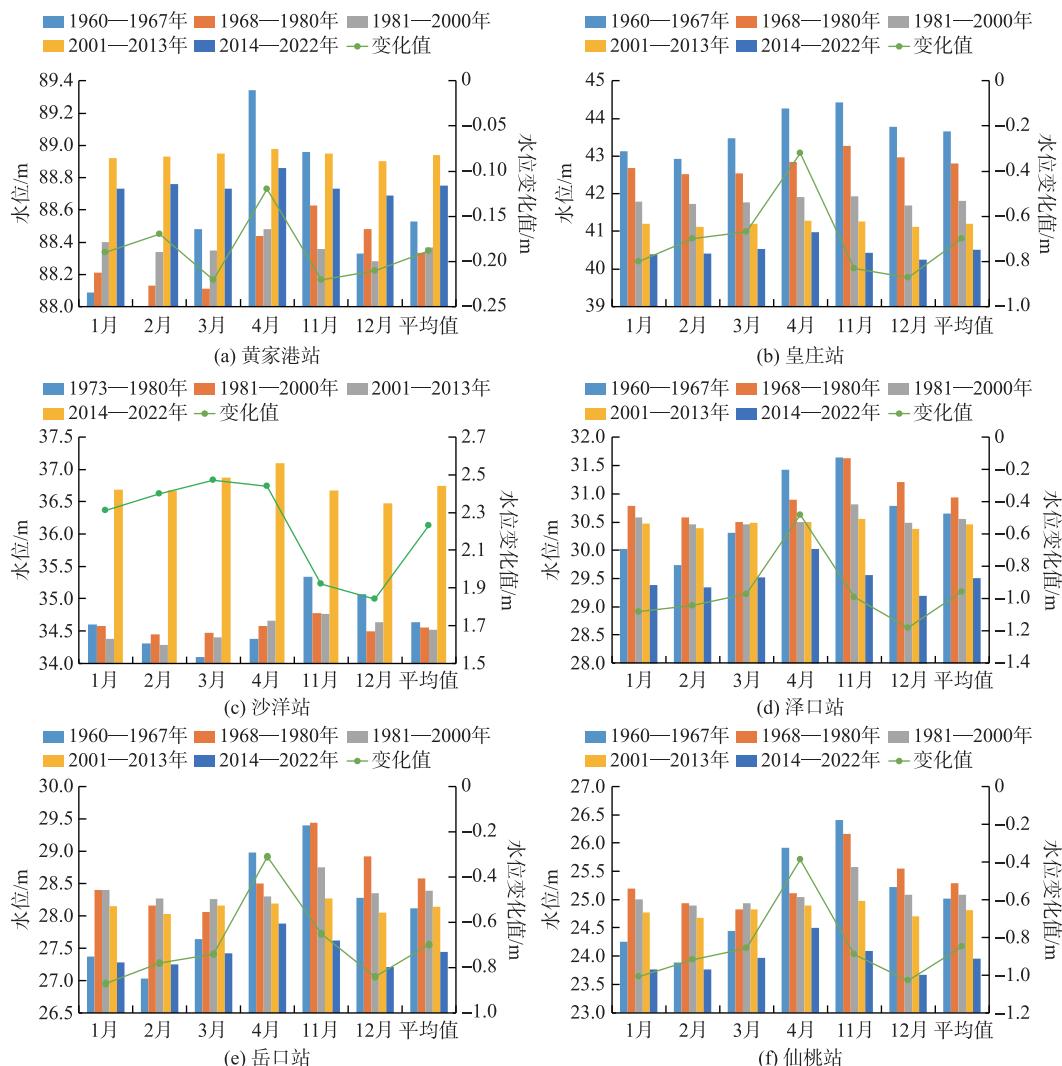


图 2 1960—2022 年汉江中下游枯水期月均水位变化

Fig. 2 Changes of monthly mean water level in the middle and lower reaches of Hanjiang River during dry season from 1960 to 2022

低;由于丹江口水库拦水拦沙,清水冲刷断面下切,使得皇庄站年均水位整体下降;南水北调中线一期、引江济汉等引调水工程运行后,因来水减少水位波动进一步降低。

3) 沙洋站,从平均水位过程来看,兴隆枢纽蓄水前沙洋水位较低,有明显的丰枯水过程,兴隆蓄水后(2014年)因其位于库区年内波动性降低,且枯水期水位基本持平。

4) 泽口站、岳口站、仙桃站,三站点枯期水位变化具有相近的规律。从平均水位过程来看,丹江口水库建库前,三站点的水位波动性较大,蓄水后,水位被调平,年内波动性降低;2014年后,受到兴隆蓄水、汉口最低水位的下降的影响,三站点的平均水位进一步下降。

5) 兴隆建设运行前后坝下游沿程水位变化,对比各站点水位变化值的沿程变化情况,除沙洋站外,水位变化值均为负值,且呈现出类似的三角形图案,4月份的水位变化幅度较小。由上至下,黄家港、皇庄、泽口、岳口、仙桃站,水位变化的平均值分别为-0.19、-0.70、-0.96、-0.70、-0.85 m,下游水位变化更为显著。

总体而言,丹江口水库建库前汉江中下游主要站点水位年内有明显的丰枯水过程,蓄水后,水位被调平,年内波动性降低。南水北调中线一期、引江济汉等引调水工程运行后,因来水减少水位年内变幅进一步降低。比较2014—2022年相对2001—2013年的绝对变化幅度,兴隆水利枢纽下游水位变化更为显著,后文将对此着重开展分析。

2 兴隆下游近坝段枯水位变化

2.1 兴隆坝址同流量枯水位变化

参考《南水北调中线工程汉江兴隆水利枢纽初步设计报告 第二分册 水文篇》^[26],根据兴隆闸(兴隆坝址上游1.6 km)1980—2003年水位资料和相应的沙洋水文站流量资料(考虑相应的传播时间)拟定兴隆闸址干流断面水位流量关系,并按比降推至兴隆坝址(图3)。为便于比较,将2014年兴隆坝址处的水位流量关系散点同样汇入图中。可以看出兴隆坝址的水位流量关系在2003—2014年间均较为稳定,初步设计报告成果与2014年实际情况较为相符。

图4中给出了兴隆水利枢纽坝下水位流量关系变化,与2014年的坝址水位流量关系曲线相比,建坝后坝址中、枯水位明显下降。在500~800 m³/s流量下,2019年实测水位与建坝前相比累计下降2.00~2.18 m,2021年实测水位较建坝前累计下降2.47~2.55 m,且存在继续下降的趋势。

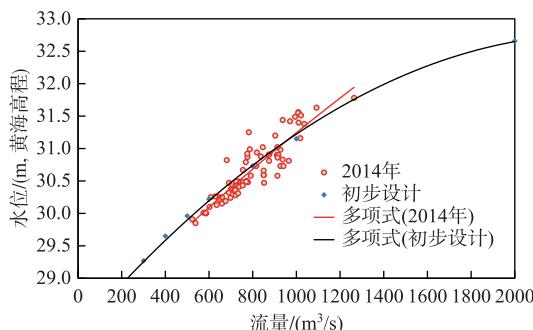


图3 2014年坝址水位流量关系同初设报告对比
Fig.3 Comparison of water level and flow relationship at dam site in 2014 with preliminary design report

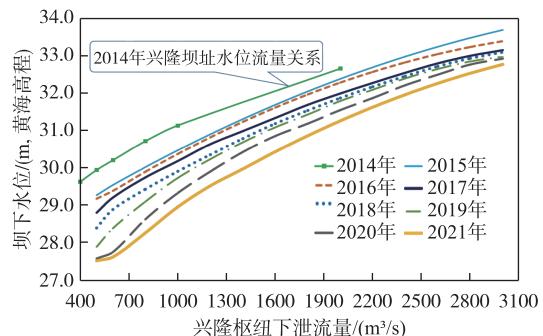


图4 兴隆水利枢纽坝下水位流量关系变化
Fig.4 Changes in water level and flow relationship under the dam of Xinglong Water Control Project

为了深入讨论水位流量关系曲线的变化,定义水位变化率指标:水位流量关系曲线上过任意一点的切线斜率为对应流量下水位随着流量增加而升高的速率^[27]。绘制水位变化率随流量变化曲线,如图5。水位变化率随流量的变化存在一个拐点流量,在这个拐点流量以下时,水位变化率绝对值较大,但随流量的增加,水位变化率迅速减小;当超过这个拐点流量后,水位变化率较小,且随着流量的增加,其减小的速度也显著减小。水位变化率与流量关系曲线的拐点实际上是水流出槽漫滩的流量,即主槽的漫滩流量。河道主槽断面形态相对窄深,当流量增大,水位上升,水面宽度增加,水位抬升相同的高度需要的流量就会更多,抬升速度就会减缓,水位变化率就会减小。而水流漫滩后,随着流量的增加,水位抬升速度显著减缓,此时水位变化率显著减小。

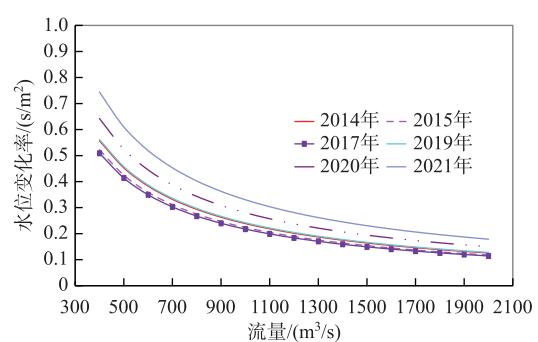


图5 2014—2021年兴隆水利枢纽
坝下水位变化率—流量关系曲线
Fig.5 Relationship curve between water level change rate and flow in the downstream of Xinglong Water Control Project from 2014 to 2021

水位变化率—流量关系曲线的拐点流量即漫滩流量发生了变化。依据图 5 中给出的水位变化率随流量变化曲线可以确定蓄水后不同时期的拐点流量:2014 年的水位变化率—流量曲线的拐点流量约为 $600 \text{ m}^3/\text{s}$, 而 2020、2021 年拐点流量约为 $700\sim800 \text{ m}^3/\text{s}$ 。显然兴隆枢纽运用后漫滩流量呈上升的趋势。漫滩流量增加反映了非饱和水流冲刷河槽, 河床下切, 滩槽高差增大。

2.2 兴隆坝下游年最低水位变化

兴隆坝下游兴隆、仙桃水文站年最小流量、最低水位的变化过程如图 6 所示。受丹江口调度、补水的影响, 两站点最小流量并未出现明显的下降趋势。2014 年后, 仙桃站的最低水位下降速率有一定程度的增加, 对该现象的原因进行分析如下。

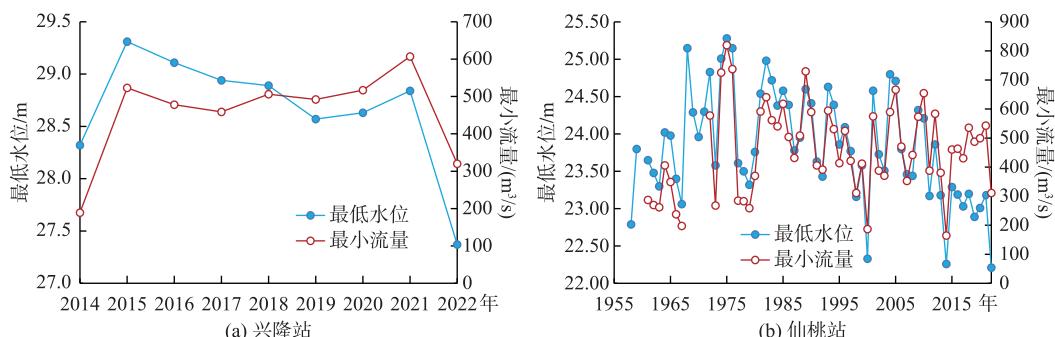


图 6 兴隆、仙桃水文站年最小流量、最低水位变化过程

Fig.6 Annual minimum flow and minimum water level variation process
at Xinglong and Xiantao hydrological stations

长江水位的高低直接影响到汉江下游河段的水动力条件, 汉江下游水位流量变化与长江来水过程有关。历史资料表明, 长江水位对汉江顶托影响的范围较大, 一般年份均可影响到仙桃, 最远还可影响到岳口、泽口。影响的程度和范围与汉口水位的高低、汉江来流量的大小直接相关。图 7 给出了汉口水文站 1958—2022 年最小流量、最低水位的变化过程, 可以发现 2005 年前, 汉口最小流量与最低水位间相关关系较好, 两曲线间波动趋势较为接近。而 2005 年后, 特别在 2015 年后两曲线间差异有所加大, 汉口站的最低水位并未随着最小流量的增大而增加。进一步分析汉口最低水位与仙桃最低水位间的相关关系(图 8), 2015 年后二者相关关系较好, R^2 高达 0.81, 而 1958—2002 年、2003—2014 年两时段 R^2 均仅为 0.03。

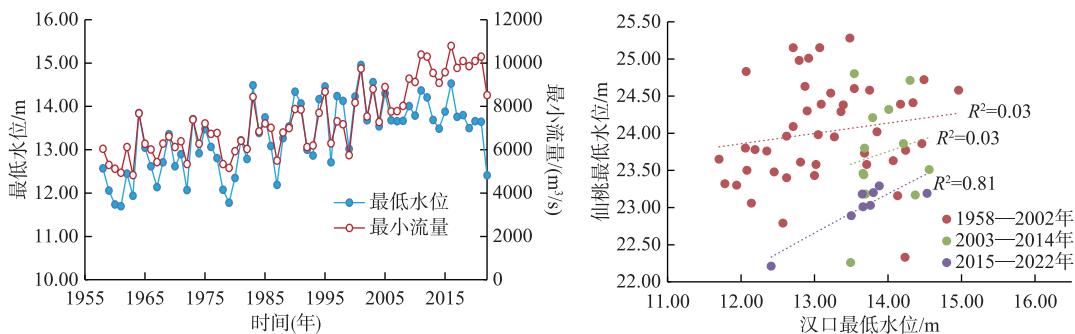


图 7 汉口水文站年最小流量、最低水位变化过程
Fig.7 Annual minimum flow and minimum water level
variation process at Hankou hydrological station

图 8 汉口最低水位与仙桃最低水位间相关关系
Fig.8 Correlation between the lowest water level in
Hankou and the lowest water level in Xiantao

综合分析兴隆坝址枯水位、仙桃站最低水位变化的特点, 兴隆近坝段枯水位下降可能的原因有两个方

面,一是兴隆水利枢纽坝下游河段的河床冲刷下切,枯水河槽冲刷明显加剧,导致枯水位下边界的改变;二是汉口最低水位下降的溯源传递效应,2014年之后汉口站的同流量枯水位^[28-29]和最低水位都出现了下降态势,下边界水位下降的溯源效应也可能导致兴隆近坝段枯水位的下降。

3 兴隆下游近坝段枯水位变化定量分析

3.1 随机森林算法

随机森林(random forests)算法是由 Breiman 提出的一种基于决策树的 Bagging 典型算法^[30],决策节点、枝及叶共同构成了决策树的树状结构,这也代表着一系列的决策规则,而上述形成的各项规则可以应用于大数据分析挖掘中的数据分类或回归问题。随机森林模型的回归过程是通过 Bagging 随机且有放回的采样方法将原数据集按一定比例进行多轮抽取形成多组训练集,对每个训练集分别进行随机选择特征进行递归构建相应决策树,所有决策树结果的均值即为回归结果。随机森林回归模型基于本身机器学习的算法具有运行高效、对异常值及多重共线性不敏感和无需特征选择等多个独特优势,能够提供相对精度较高的预测结果。当目标变量是连续(数值)变量时,通过随机森林分析能够预测其它变量(解释变量)构成的模型对目标变量(因变量)的解释量以及其它变量对该目标变量的重要性。

徐嘉远等^[31]、王艺璇等^[32]利用随机森林这一特性,分别开展了随机森林算法识别模型最优解释变量、径流变化归因分析等工作。本次研究以兴隆枢纽坝下水位作为因变量,以部分重要枯水位下降驱动因子作为解释变量构建随机森林模型,通过变量重要性分析识别影响坝下水位的关键解释变量。

3.2 关键解释变量分析

依据前述分析成果,兴隆站输沙率(河床冲刷的重要原因)、兴隆至泽口河槽容积(影响枯水位下边界)等为影响兴隆坝下水位的潜在重要因素。而出库流量、兴隆站流量(包含引江济汉补水流量)是影响兴隆坝下水位的直接因素。

2.1 节中分析表明,兴隆坝址的水位流量关系在2003—2014年间均较为稳定,2015年后水位流量关系变化明显,故研究以2014年为基准年,将2015—2021年输入(出库流量C1、兴隆站流量C2、兴隆站输沙率C3、兴隆-泽口河槽容积C4)、输出(兴隆坝下水位)数据进行归一化后,建立随机森林模型对兴隆坝下水位下降因素进行模拟。当输入、输出数据进行归一化后,其输入输出因素由绝对值变成了相对变幅,可消除输入因子量纲差异对分析结果的影响。

计算工况选取2000、1000、500 m³/s三级流量下的数据。如500 m³/s下的输入、输出数据分别为2015—2021年,出库流量在1~500 m³/s下的数据条目(出库流量、兴隆站流量、兴隆站输沙率、兴隆坝下水位)以及兴隆-泽口河槽容积(500 m³/s对应水位约56黄海30.5 m高程以下)。

3种工况下计算得到的解释变量重要性相对分数,如图9所示。由图可知:

1) 1000 m³/s流量级下,坝下水位的影响因素更为复杂,各因子间的差异不大。而2000、500 m³/s流量级下,各因子间的差异较大。

2) 在2000、1000 m³/s流量级下,C2影响大于C1;而500 m³/s流量级下,C1重要程度较C2更高。此结果说明,当极端枯水的情况下,兴隆坝下水位受其出库流量的影响更为直接,而引江济汉补水流量的作用相对较小。现有调度实践也可证明该结果:近年来兴隆枢纽调度实践表明,中低水条件下,引江济汉补水流量增加,导致高石碑出水位升高,进而对兴隆坝下水位具有抬升作用,但这是

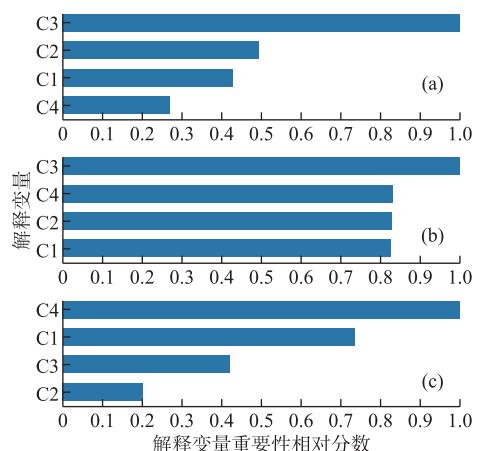


图9 不同工况下解释变量重要性相对分数:

(a) 2000 m³/s, (b) 1000 m³/s, (c) 500 m³/s

Fig.9 Relative scores of importance of explanatory

variables under different flows:

(a) 2000 m³/s, (b) 1000 m³/s, (c) 500 m³/s

干流流量增加对上游水位的短期壅高。当出水闸关闭后,这种顶托作用随即消失。

3) 出库流量较小时,兴隆至泽口的河槽容积 C4 对坝下水位的影响增强,2000、1000、500 m³/s 流量级下,C4 的重要性分别排名第四、第二、第一,其相对分数也由约 0.3 增加至约 0.8、1.0。此结果可间接说明,兴隆坝下冲刷主要集中在枯水河槽内,这也同实际情况相符。

4) 在 2000、1000 m³/s 流量级下,最重要解释变量为兴隆站输沙率 C3;而 500 m³/s 流量级下,最重要解释变量为兴隆至泽口的河槽容积 C4。但河道输沙率锐减,导致次饱和水流冲刷沿程河床,是河槽容积产生变化的根本原因。此结果说明,在出库流量、兴隆站流量、兴隆站输沙率、兴隆-泽口河槽容积 4 项可直接量化的因素中,对兴隆坝下水位变化影响最大的因素为兴隆站输沙率的锐减。

随机森林算法可以有效识别回归分析中的重要解释变量,通过量化解释变量对因变量的贡献,获取对因变量贡献的排序,针对识别影响兴隆坝下水位解释变量的问题,其计算结果与调度实践、实际情况可相互验证,可靠性较好。

4 兴隆近坝段枯水位变化成因讨论

除出库流量、兴隆站流量、兴隆站输沙率、兴隆-泽口河槽容积 4 项可直接量化的因素外,仍有航道整治工程等无法量化的因子,对枯水位下降也有十分重要的驱动作用。一方面,水沙条件是塑造河床形态的动力源泉,流量、含沙量变化导致天然河道冲刷演变直接引发了坝下水位的下降;另一方面,汉江中下游局部航道整治也加剧了枯水河槽冲刷,人类活动的干预也是引起兴隆坝下枯水位下降的原因之一。从河床边界条件的变化可以进一步判断河床冲刷下切的发展情况。

4.1 航道整治工程的影响

汉江局部航道整治工程治理了兴隆至汉川共 190 km 的河段。通过修筑丁坝、护滩带、疏浚航道等整治手段,达到“束水攻沙”、稳定枯水航槽、维护航道尺度的目的。航道整治工程实施后,一方面受上游多级枢纽调控的影响,汉江中下游高水上滩几率下降,另一方面大部分中低滩体得到守护,滩体的冲刷强度相对河槽偏小,甚至出现淤积。河道内滩体的相对稳定进一步促进了枯水河槽的冲刷,是兴隆坝下枯水位下降的重要原因之一。

以兴隆至泽口河段为例,部分断面左岸或右岸分别或均实施有航道整治护滩工程,断面的冲淤变化主要集中在河槽部分,以河槽冲刷下切为主要形式,部分存在滩体崩退后退。如 HX092 断面,2012 年主泓贴靠右岸滩体,最低点高程为 21.97 m,至 2022 年,河槽中部河床大幅下切,最低点高程下降至 6.91 m,深泓向左岸侧摆动 231 m。HX096 和 HX098 断面的变化较为相似,均为主泓附近河床单向冲刷下切,深泓点下切幅度分别为 6.82 和 5.10 m(图 10)。

4.2 河床边界条件的变化

兴隆坝址下游兴隆水文站 2014—2022 年逐月的床沙粒径组成变化,如图 11 所示,该站河床组成以粒径 d<0.25 mm 的细沙为主,床沙中数粒径除个别年份的个别测次偏小以外,大多数测次取值都在 0.15~0.25 mm 之间,年内汛前略偏大,汛期和汛后略偏小;d<0.25 mm 的细沙含量大多数测次都在 70% 以上,年内无明显变化。年际间,2014—2022 年,汛前床沙中数粒径有所减小,全年 d<0.25 mm 的细沙含量增大。

兴隆坝址及下游河段的河床组成偏细,细沙覆盖层厚度大,尽管 2012—2022 年河床冲刷强度加大,主河槽最大冲刷深度接近 15 m,但床沙组成没有出现粗化的现象,甚至因为枢纽拦沙,粗颗粒泥沙补给迅速减少,下游近坝河段床沙还出现细化,表明兴隆枢纽坝下游近坝河段的河床冲刷仍停留在细沙层,河床仍将继续冲刷下切。

5 结论

汉江兴隆水利枢纽运行后,坝下游近坝段枯水位较建坝前下降明显,对工程安全及效益发挥带来不利影响,本文对枯水位下降的成因进行了深入剖析。主要结论如下:

1) 兴隆水利枢纽蓄水运用后,主要受上游崔家营、雅口、碾盘山等水库建设运行的影响,皇庄、兴隆水文站的输沙减少幅度基本相当。而皇庄至兴隆段输沙量沿程变化较小,表明兴隆枢纽的拦沙作用十分有限。

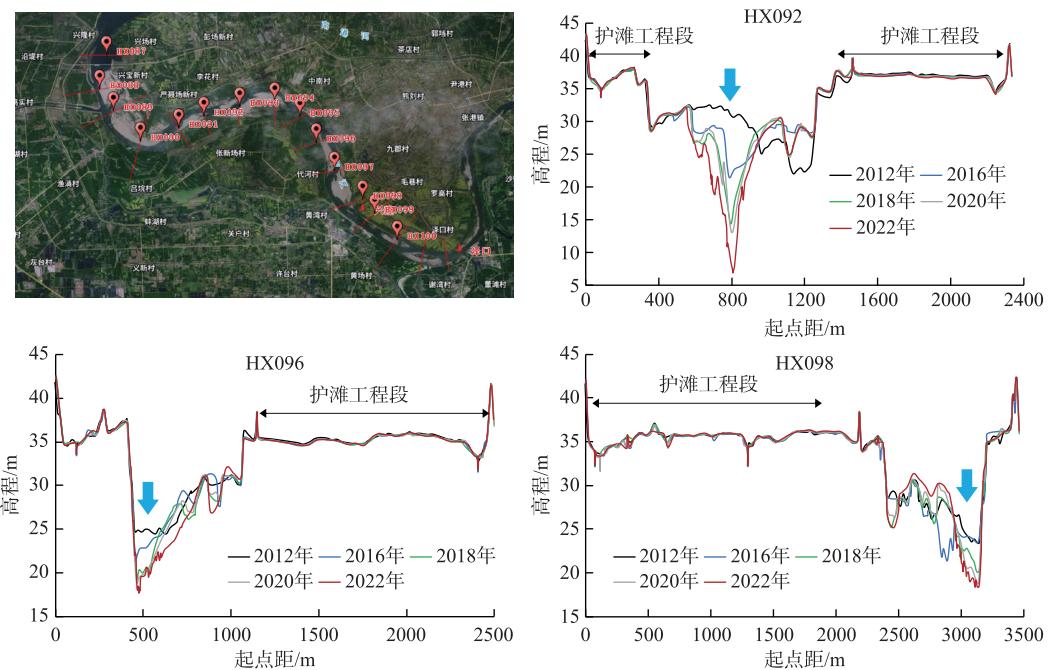


图 10 兴隆至泽口河段典型横断面变化

Fig. 10 Typical cross section changes of Xinglong to Zekou River Section

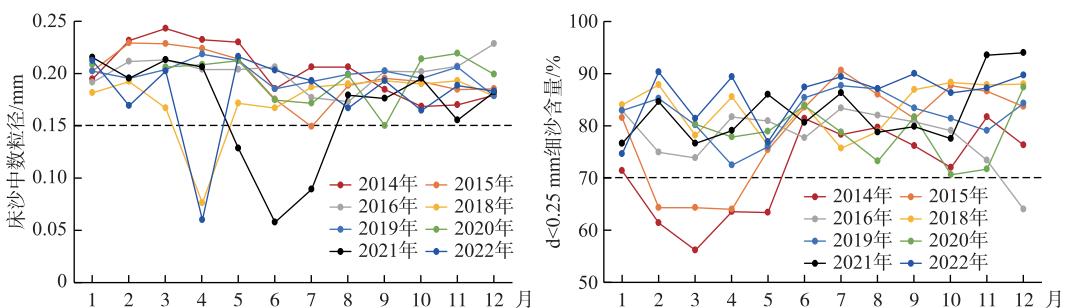


图 11 2014—2022 年兴隆水文站床沙组成变化

Fig. 11 Changes in bed sediment composition at Xinglong Hydrological Station from 2014 to 2022

皇庄上游输沙减少是兴隆以下河床冲刷加剧的重要原因之一,高水调平导致的年内枯水上滩几率下降和航道整治护滩工程是强冲刷过程中“滩淤槽冲”的核心因素。

2) 兴隆建坝后坝址同流量下、枯水位明显下降,500~800 m³/s 流量下,2021 年较运行前坝下水位累计下降 2.47~2.55 m,且存在继续下降的趋势,漫滩流量呈上升的趋势,漫滩流量增加反映了非饱和水流冲刷河槽,河床下切,滩槽高差增大。坝下游河段枯水河槽冲刷导致枯水位下边界的改变,以及汉口最低水位下降的溯源传递效应均促进了兴隆近坝段枯水位下降。

3) 随机森林分析显示,在出库流量、兴隆站流量、兴隆站输沙率、兴隆-泽口河槽容积 4 项可直接量化的因素中,对兴隆坝下水位变化影响最大的因素为兴隆站输沙率的锐减。此外,仍有航道整治工程、河床边界条件等无法量化的因子,对枯水位下降也有十分重要的驱动作用。

4) 兴隆坝址及下游河段的河床组成偏细,细沙覆盖层厚度大,尽管 2012—2022 年河床冲刷强度加大,

但床沙组成没有出现粗化的现象,2014—2022年,年际间汛前床沙中数粒径有所减小,全年粒径<0.25 mm的细沙含量增大,表明兴隆枢纽坝下游近坝河段的河床冲刷仍停留在细沙层,河床仍将延续冲刷下切,枯水位尚未达到稳定状态。

5)为解决目前坝下游近坝段枯水位下降对枢纽发电、通航等的不利影响,需统筹考虑汉江中下游水资源、水生态安全需求,如汉江中下游抑制水华、鱼类繁殖的生态调度等,适当加大丹江口水库对下游河道的补水量,并着眼于引江补汉工程建设,构建近期、远期情景下的汉江中下游水资源优化配置方案。

6 参考文献

- [1] Zhu LL, Chen D, Yang CG *et al.* Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and scouring of river channel under dam. *J Lake Sci.*, 2023, 35(3): 1097-1110. DOI: 10.18307/2023.0327. [朱玲玲, 陈迪, 杨成刚等. 金沙江下游梯级水库泥沙淤积和坝下河道冲刷规律. 湖泊科学, 2023, 35(3): 1097-1110.]
- [2] Yao X, Yang GS, Wan RR *et al.* Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes. *J Lake Sci.*, 2014, 26(6): 813-821. DOI: 10.18307/2014.0601. [姚鑫, 杨桂山, 万荣荣等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响. 湖泊科学, 2014, 26(6): 813-821.]
- [3] Tang JW, You XY, Li YT *et al.* Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on navigation conditions in middle and Lower Yangtze River. *Journal of Hydropower Engineering*, 2014, 33(1): 102-107. [唐金武, 由星莹, 李义天等. 三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析. 水力发电学报, 2014, 33(1): 102-107.]
- [4] Li YT, Xue JL, Sun ZH *et al.* Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydropower Engineering*, 2021, 40(4): 1-13. DOI: 10.11660/slfdb.20210401. [李义天, 薛居理, 孙昭华等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化. 水力发电学报, 2021, 40(4): 1-13.]
- [5] Han QW. Advances of sediment research during demonstration and feasibility study of Three Gorges Project. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, 45(9): 1-5, 23. [韩其为. 三峡工程论证及可行性研究阶段泥沙研究工作的几点进展. 水利水电技术, 2014, 45(9): 1-5, 23.]
- [6] Yang YP, Zhang MJ, Li SZ *et al.* Transport patterns of the coarse and fine sediments and its causes in the downstream of the Three Gorges Dam. *J Lake Sci.*, 2017, 29(4): 942-954. DOI: 10.18307/2017.0418. [杨云平, 张明进, 李松喆等. 三峡大坝下游粗细颗粒泥沙输移规律及成因. 湖泊科学, 2017, 29(4): 942-954.]
- [7] Li SX, Yang YP, Zhang HQ *et al.* The scouring and siltation in river channels of the middle reaches of the Yangtze River (1975–2017) before/after the Three Gorges Project. *J Lake Sci.*, 2021, 33(5): 1520-1531. DOI: 10.18307/2021.0520. [李少希, 杨云平, 张华庆等. 三峡工程运行前后的长江中游河段冲淤变化(1975—2017年). 湖泊科学, 2021, 33(5): 1520-1531.]
- [8] Zhu LL, Chen JC, Yuan J *et al.* Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 348-357. [朱玲玲, 陈剑池, 袁晶等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响. 水科学进展, 2014, 25(3): 348-357.]
- [9] Zhu LL, Xu QX, Chen ZH. Extraordinary scour of Jingjiang reach downstream from Three Gorges Project. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(1): 85-97. [朱玲玲, 许全喜, 陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(1): 85-97.]
- [10] Tang JW, Li YT, Sun ZH *et al.* Preliminary study on the changes of water level at Chenglingji Station after the impoundment of the Three Gorges Project(TGP). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2): 273-280. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2010.02.0010. [唐金武, 李义天, 孙昭华等. 三峡蓄水后城陵矶水位变化初步研究. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 273-280.]
- [11] Li YR, Ge SH, Chu B. Analysis on water level-discharge relation of Jingjiang River during low water level period before and after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2011, 42(6): 75-79. [李玉荣, 葛松华, 储蓓. 三峡水库建库前后荆江低水水位流量关系分析. 人民长江, 2011, 42(6): 75-79.]
- [12] 饶冠生, 孙尔雨, 李发政. 葛洲坝下游水位下降问题初探. 人民长江, 1999, 30(9): 28-30.
- [13] Pang XS, Du JM, Jia DD *et al.* Water level drop characteristics and its control measures for lower near-dam reaches of Changzhou hydro-junction on the Xijiang River. *Hydro-Science and Engineering*, 2014, (3): 42-48. [庞雪松, 杜敬民, 假冬冬等. 西江长洲枢纽下游近坝段水位下降特征及调控措施. 水利水运工程学报, 2014, (3): 42-48.]
- [14] 马爱兴, 曹民雄, 胡颖等. 多重因素影响下西江长洲枢纽至界首段枯水位降落特征. 中国水运(下半月), 2020, 20(11): 97-98, 101.
- [15] Yan SX, Long YN, Jiang CB *et al.* The relationship between the change trend of water level and riverbed evolution in the downstream of Xiangjiang River. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(6): 150-156. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.23. [闫世雄, 隆院男, 蒋昌波等. 湘江下游水位变化趋势与河床演变关系研究. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 150-156.]

- [16] Feng XX, Zhang M. Study on waterway regulation in near-dam reach downstream the Yanzhou hydro-junction. *Journal of Waterway and Harbor*, 2015, **36**(5): 409-413. [冯小香, 张明. 艳洲枢纽下游近坝段航道整治研究. 水道港口, 2015, **36**(5): 409-413.]
- [17] Guo HL, Shi YS, Jiao YJ et al. Design of sluice foundation treatment of Xinglong Hydrojunction Project on Hanjiang River. *Yangtze River*, 2015, **46**(15): 26-29. [郭红亮, 石运深, 焦雨佳等. 汉江兴隆水利枢纽泄水闸地基处理设计. 人民长江, 2015, **46**(15): 26-29.]
- [18] 宾贝丽, 由星莹. 汉江兴隆-泽口河段演变及枯水位变化分析. 中国农村水利水电, 2020, (9): 105-111.
- [19] Huang JC, Huang XY, Zhou YJ et al. Causes and preventive measures of water level drawdown downstream near the dam site of Xinglong hydrojunction project on Hanjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(7): 13-16, 22. DOI: 10.11988/cyyb.20210559. [黄建成, 黄雪颖, 周银军等. 汉江兴隆水利枢纽下游近坝段水位下降成因及防治对策. 长江科学院院报, 2022, **39**(7): 13-16, 22.]
- [20] You XY, Wang ZQ, Peng XP et al. Cause analysis of decline of low water level downstream the dam of Xinglong hydro-junction on Hanjiang River. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, **40**(11): 9-15. DOI: 10.11988/cyyb.20220840. [由星莹, 王祖卿, 彭翔鹏等. 汉江兴隆枢纽坝下枯水位下降成因浅析. 长江科学院院报, 2023, **40**(11): 9-15.]
- [21] Lai CG, Chen XH, Zhao SW et al. A flood risk assessment model based on Random Forest and its application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(1): 58-66. [赖成光, 陈晓宏, 赵仕威等. 基于随机森林的洪灾风险评价模型及其应用. 水利学报, 2015, **46**(1): 58-66.]
- [22] Yang G, Guo SL, Chen KB et al. Multi-objective cascade reservoir optimal operation rules based on decision factor selection. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(8): 914-923. [杨光, 郭生练, 陈柯兵等. 基于决策因子选择的梯级水库多目标优化调度规则研究. 水利学报, 2017, **48**(8): 914-923.]
- [23] Chen KB, Li SW, He QK et al. On the importance of key hydrological information on dispatching decision of Three Gorges Reservoir. *Hydropower and New Energy*, 2022, **36**(11): 45-49. [陈柯兵, 李圣伟, 何奇锴等. 关键水文信息对三峡水库调度决策的重要性分析. 水电与新能源, 2022, **36**(11): 45-49.]
- [24] Zhang YY, Yuan F, Zhang LM et al. Impacts of water diversion of middle-route project on hydrological regimes of middle and lower reaches of Hanjiang River. *Journal of China Hydrology*, 2022, **42**(3): 89-94, 66. [张怡雅, 袁飞, 张利敏等. 中线调水对汉江中下游区水文情势影响研究. 水文, 2022, **42**(3): 89-94, 66.]
- [25] Bai L, Xu QX, Dong BJ. Study on riverbed erosion and deposition change in middle and lower reaches of Hanjiang River since impoundment operation of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2021, **52**(12): 15-20. [白亮, 许全喜, 董炳江. 丹江口水库蓄水以来汉江中下游河床冲淤变化研究. 人民长江, 2021, **52**(12): 15-20.]
- [26] 长江勘测规划设计有限公司. 南水北调中线工程汉江兴隆水利枢纽初步设计报告. 武汉: 长江勘测规划设计有限公司, 2011.
- [27] Chen L, Fang FK, Yuan J et al. Analysis of the complex processes of water and sediment conditions in the middle reaches of the Hanjiang River. *Journal of Sediment Research*, 2020, **45**(3): 15-21. [陈立, 房复康, 袁晶等. 汉江中游河段来水来沙条件复杂变化分析. 泥沙研究, 2020, **45**(3): 15-21.]
- [28] Han JQ, Sun ZH, Yang YP. Flood and low stage adjustment in the middle Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR). *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1217-1226. DOI: 10.18307/2017.0520. [韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1217-1226.]
- [29] Xu QX, Dong BJ, Yuan J et al. Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 650-661. DOI: 10.18307/2023.0221. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 650-661.]
- [30] Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.
- [31] Xu JY, Zou L, Xia J et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(6): 104-110. [徐嘉远, 邹磊, 夏军等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析. 水资源保护, 2023, **39**(6): 104-110.]
- [32] Wang YX, Liu X, Shen YJ. Applicability of the random forest model in quantifying the attribution of runoff changes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(5): 864-874. DOI: 10.12357/cjea.20210652. [王艺璇, 刘夏, 沈彦军. 随机森林模型在径流变化归因分析中的适用性研究. 中国生态农业学报, 2022, **30**(5): 864-874.]