

杨胜天, 朱贻凡, 周柏池, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区泥沙淤积分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 865-874. YANG S T, ZHU Y F, ZHOU B C, et al. Sediment deposition in the flood detention area of the "23·7" super large flood in the Haihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 865-874. (in Chinese)

海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区泥沙淤积分析

杨胜天¹, 朱贻凡¹, 周柏池¹, 娄和震¹, 丁建新¹, 宋文龙²,
丛佩娟³, 龚记熠¹, 王怀星¹, 李杰康¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心), 北京 100038; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053)

摘要:为探究海河“23·7”流域性特大洪水过程中蓄滞洪区泥沙淤积特征, 评估受灾情况, 基于实地淤积调查和高分遥感影像, 计算淤积厚度空间分布, 并结合 DEM 数据估算蓄滞洪量和蓄滞洪区利用率。结果表明: 淤积厚度插值的均方根误差 E_{RMS} 为 1.32, 纳什系数 E_{NS} 为 0.78, 蓄滞洪量计算的 E_{RMS} 为 0.75, E_{NS} 为 0.92, 证明研究计算方法可行, 计算结果可靠; 8 个蓄滞洪区共蓄洪 24.63 亿 m^3 , 蓄滞洪区利用率约为 36.90%, 平均淤积厚度为 2.60 cm, 总淤积量达 7.67×10^7 t; 海河流域洪水含沙量约 $31.14 \text{ kg}/m^3$, 其中大清河系和永定河系的洪水含沙量达到过去 20 a 平均含沙量的 20~40 倍; 此外, 研究发现海河流域西部和北部山地的淤积情况更严重, 较早启用的、位于上游的蓄滞洪区淤积量更大。

关键词:“23·7”流域性特大洪水; 海河流域; 蓄滞洪区; 泥沙淤积

中图分类号: TV122; TV873; TP593 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0086

受台风杜苏芮残余环流, 以及副热带高压、台风“卡努”水汽输送和地形综合作用的影响^[1], 2023 年 7 月 28 日至 8 月 1 日海河流域出现自 1963 年以来最极端的特大暴雨^[2], 面降雨量累计达 155.3 mm^[3], 形成海河“23·7”流域性特大洪水, 22 条河流发生超警以上洪水, 8 条河流发生有实测资料以来的最大洪水^[4-5]。为应对紧急情况, 启用了流域内 8 处蓄滞洪区^[6], 洪水造成蓄滞洪区内大量泥沙淤积, 对生活造成影响^[7-11]。

为防治灾害, 已经开展了蓄滞洪区淹没情况和洪水演进的调查研究。杜晓鹤等^[6]和褚明华等^[12]基于蓄滞洪区运用情况, 评价了蓄滞洪区在特大洪水过程中发挥的重要作用; 宋文龙等^[4]基于光学和雷达卫星影像, 提取了蓄滞洪区不同时期的淹没范围和面积; 王玮琦等^[13]和吴滨滨等^[3]分别利用 FASFLOOD 和 IFMS/Urban 搭建二维水动力学模型和一维、二维耦合水动力学模型, 模拟和预报了洪

水演进和退洪过程; 张念强等^[14]通过构建蓄滞洪区一维和二维洪水模型, 分析了蓄滞洪区启用和退洪动态风险; 丁志雄^[15]根据土地利用结构, 构建了二维洪水数值仿真模型, 分析了涿州市内淹没情况。尽管“23·7”流域性特大洪水调查研究取得了很多成果, 但因蓄滞洪区数目多、面积广, 现有研究的调查覆盖范围和调查内容不足。

目前, 泥沙淤积调查主要集中在河流、水库等区域, 或针对泥石流等自然灾害。刘洁等^[16]通过分析 1956—2015 宜昌水文站径流和泥沙资料, 探讨了输沙量的变化特征及其对三峡水库泥沙淤积的影响; 方迎潮等^[17]基于云南东川蒋家沟泥石流 2003—2014 年淤积体断面厚度监测数据, 通过累加断面剖面图, 计算了不同时期的淤积量。这些方法大多依赖于长期的水文站或断面监测数据, 但在单次洪水过程中, 含沙量变化迅速, 此类资料获取难度较大, 导致泥沙淤积调查的精度难以保证。也有研究采

收稿日期: 2024-02-27 修回日期: 2024-08-06 网络出版时间: 2024-08-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240812.1411.004>

基金项目: 北京市水土流失监测专项项目(11000023210200046167-XM001/2)

作者简介: 杨胜天(1965—), 男, 贵州贵阳人, 教授, 主要从事遥感水文研究。E-mail: 03018@bnu.edu.cn

通信作者: 丁建新(1974—), 男, 河南项城人, 博士研究生, 主要从事遥感水文、流域管理、水利工程运行管理、水土保持研究。E-mail: 202238470002@bnu.edu.cn

用实地调查的方式,叶蕾^[18]通过实地分段测量、取平均值统计的方式,对金沙江“11·13”白格堰塞湖洪水过程中河漫滩的淹没面积和泥沙淤积量进行了测算。但是海河“23·7”流域性特大洪水影响巨大,蓄滞洪区范围广泛,淤积体厚度的空间异质性更强,此类方法在大范围蓄滞洪区的淤积调查和分析中需要投入大量人力物力,在应急工作中难以开展。

为此,本研究在灾后 2023 年 8 月 29 日即采用卫星遥感、无人机拍摄和地面调查相结合的方法,开展蓄滞洪区淤积野外快速调查,并通过空间计算,分析海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区泥沙淤积情况。主要有:①解译 ZY-1F(资源一号 02E 卫星)和 GF-2(高分二号卫星)遥感影像,获取 8 个蓄滞洪区的淤积范围,在实地开展淤积情况调查,计算出淤积体厚度、体积和淤积量等特征;②结合洪痕测量最大淹没深度,计算平均淹没深度、蓄滞洪量、蓄滞洪区利用率和洪水含沙量等特征;③验证淤积厚度和洪水含沙量计算的可靠性,分析淤积、淹没特征和洪水含沙特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

调查了洪水中启用的东淀、兰沟洼、宁晋泊、大陆泽、共渠西、小清河、献县和永定河 8 个蓄滞洪区,根据外业调查结果以及蓄滞洪区设计和启用情况^[6,14],各蓄滞洪区所属水系、涉及省市、规划面积、设计蓄滞洪量和启用时间等基本情况见表 1。蓄滞洪区在 2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日相继启用,总规划面积为 3 822.1 km²,总设计蓄滞洪量为 66.7 亿 m³,主要涉及北京、天津、河北和河南的大清河、滏阳河、漳卫河、子牙河和永定河等水系。

蓄滞洪区空间位置分布见图 1。根据行洪路径,永定河蓄滞洪区主要分泄永定河洪水,小清河、兰沟洼和东淀共同分泄大清河洪水,宁晋泊和大陆泽共同分泄滏阳河洪水,献县和共渠西则分别分泄滹沱河和渭河的洪水。

1.2 蓄滞洪区淤积调查

调查的主要方法流程包括采样点布设、淤积数据采集、蓄滞洪区淤积计算以及计算结果分析 4 个步骤(图 2)。解译淤积范围,确定淤积采样点空间位置;实地调查,采集淤积数据,包括测量淤积厚度和洪痕高度,以及采集淤积体样本;根据实地调查数据,计算蓄滞洪区的淤积体积、淤积量、蓄滞洪量

和洪水含沙量;结合计算结果,分析蓄滞洪区泥沙淤积特征。

表 1 蓄滞洪区基本情况

Tab. 1 Basic information of flood detention areas

蓄滞洪区名称	所属水系	涉及省(直辖市)	规划面积/km ²	设计蓄滞洪量/亿m ³	启用时间
小清河		北京和河北	335.3	2.9	7月31日 12:00
兰沟洼	大清河系	河北	253.0	3.2	7月31日 12:00
东淀		天津和河北	378.8	12.9	8月1日 02:00
永定河	永定河系	天津和河北	487.7	4.0	8月2日 06:00
宁晋泊		河北	1 460.0	26.9	7月30日 20:00
大陆泽	子牙河系	河北	581.0	8.6	7月30日 20:00
献县		河北	331.4	5.4	8月1日 11:00
共渠西	漳卫河系	河南	94.9	2.8	8月1日 15:00

1.2.1 采样点布设

研究利用 ZY-1F 和 GF-2 遥感影像目视解译泥沙淤积区,获取淤积范围,然后根据各淤积区的规模大小设定调查点。共布设 496 个地面调查点(图 3),其中包括 115 处采样点和 381 处观察点。在采样点,进行剖面挖掘、淤积层测量、采样和无人机地形三维航测;在观察点,进行洪痕、淤积和景观调查。此外,为了验证调查计算可靠性,在采样点中留出 20 处作为精度验证点。

1.2.2 淤积数据采集

淤积数据采集的主要工作内容包括:前往剖面采样点,利用 DJI Mavic 2 Pro(大疆御 2 Pro)开展低空无人机 3D 航测,测量精度为 2~5 cm;挖掘淤积体剖面,利用钢尺、RTK(实时动态定位技术)等工具精确测量淤积体厚度,并记录土地利用和景观等实地情况;在淤积体上,利用 50 cm³ 环刀采集淤积体样品,采用环刀法^[19]测定淤积体容重;利用 RTK 测量并记录洪痕高度,估算平均淹没深度。

1.3 蓄滞洪区淤积计算

1.3.1 淤积特征计算

将所有剖面采样点和实地观察点进行数字化,利用采样点和观察点,在 ArcMap 10.2 中利用克里金法进行插值^[20],得到整个淤积范围的淤积体厚度

空间分布。结合 20 处验证点的淤积体厚度采样结果,计算决定系数 (R^2)、均方根误差 (E_{RMS}) 和纳什系数 (E_{NS}) 等,验证淤积厚度插值精度。统计各蓄滞洪区的平均淤积厚度 \bar{H}_s ,结合测定的淤积体密度 γ_s ,计算淤积体积 V_s 和淤积量 M_s :

$$V_s = \bar{H}_s \cdot A_s \quad (1)$$

$$M_s = V_s \cdot \gamma_s \quad (2)$$

式(1)和(2)中: V_s 为淤积范围内的淤积体积, m^3 ; M_s 为淤积体质量, kg ; \bar{H}_s 为平均淤积厚度, m ; A_s 为淤积面积, m^2 ; γ_s 为淤积泥沙的密度, t/m^3 。

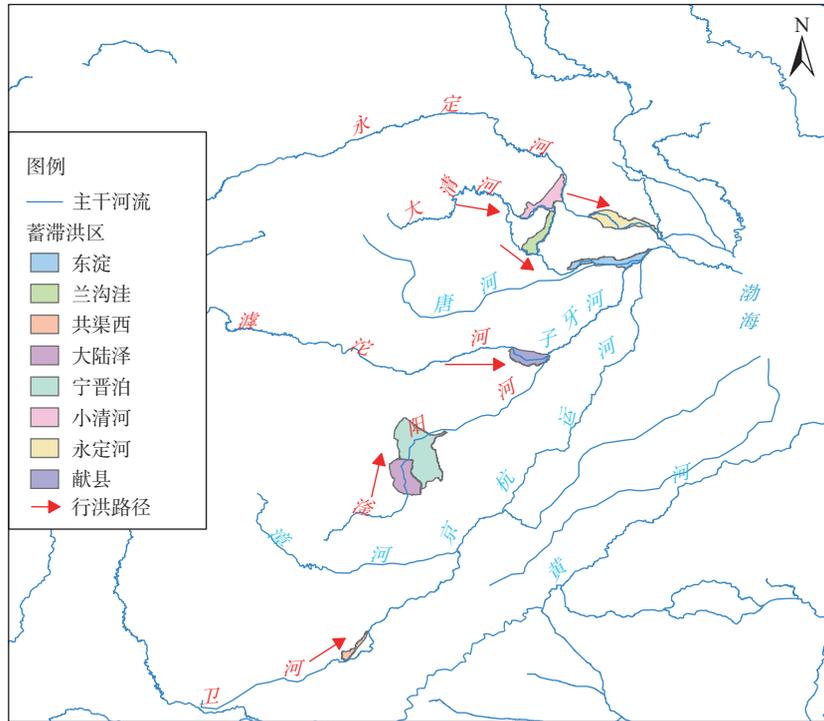


图 1 海河流域主要蓄滞洪区空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of major flood detention areas in the Haihe River basin

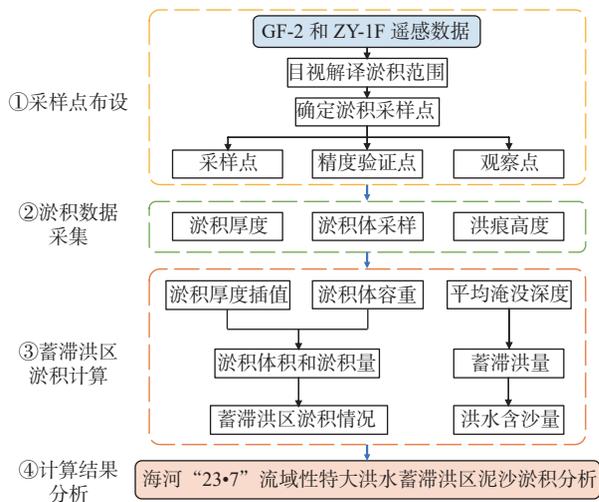


图 2 淤积调查方法流程

Fig. 2 Flow chart of sediment deposition investigation method

1.3.2 洪水含沙量计算

根据洪痕高度推求调查点淹没深度,估算洪水过程最大淹没深度 H_f 。然后利用 SRTM1 V3.0 DEM 数据,将 H_f 作为蓄滞洪区内的水深,在 ArcMap 中计算水面至地表的总水量体积^[21],作为蓄滞洪量 V_f ,计

算蓄滞洪区利用率(总蓄滞洪量占设计蓄滞洪量的比例) R_s 、估算洪水平均含沙量 S ,计算公式为

$$H_f = h + h_f \quad (3)$$

$$V_f = \overline{H_f - h_{<H_f}} \cdot X_p Y_p n_p \quad (4)$$

$$R_s = \frac{V_f}{V_D} \times 100\% \quad (5)$$

$$S = \frac{M_s}{V_f} \quad (6)$$

式(3)~(6)中: H_f 为最大淹没深度, m ; V_f 为蓄滞洪量, m^3 ; R_s 为蓄滞洪区利用率, $\%$; S 为洪水平均含沙量, kg/m^3 ; h 为 DEM 数据中的调查点高程, m ; h_f 为外业调查中得到的洪痕高度, m ; $h_{<H_f}$ 为小于 H_f 的像元高程, m ; X_p 为像元长度, m ; Y_p 为像元宽度, m ; n_p 为小于 H_f 的像元个数; V_D 为设计蓄滞洪量, m^3 。

2 结果与分析

2.1 蓄滞洪区淤积体空间分布情况

基于布设的 85 处剖面采样点和 381 处实地观察点的淤积体厚度数据,利用 ArcMap 的克里金插

值方法进行研究,生成各蓄滞洪区淤积厚度空间分布图(图 4)。在所有蓄滞洪区中,小清河和永定河蓄滞洪区分别位于北京西南部和河北西北部山地丘

陵区,其淤积厚度相对其他蓄滞洪区更大,平均值分别达到 10.89 和 6.06 cm。下游的兰沟洼和东淀蓄滞洪区,其平均淤积厚度逐渐减小,为 0.68 和 0.20 cm。

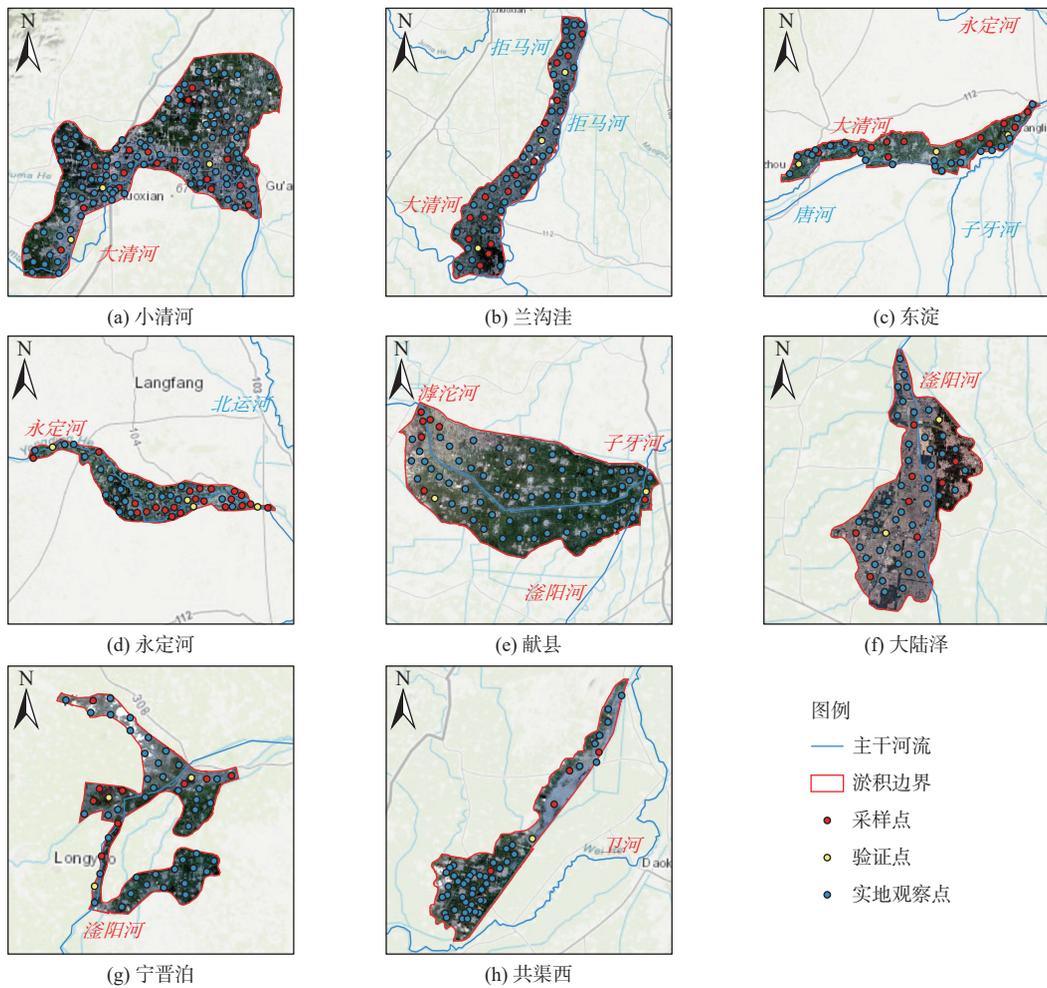
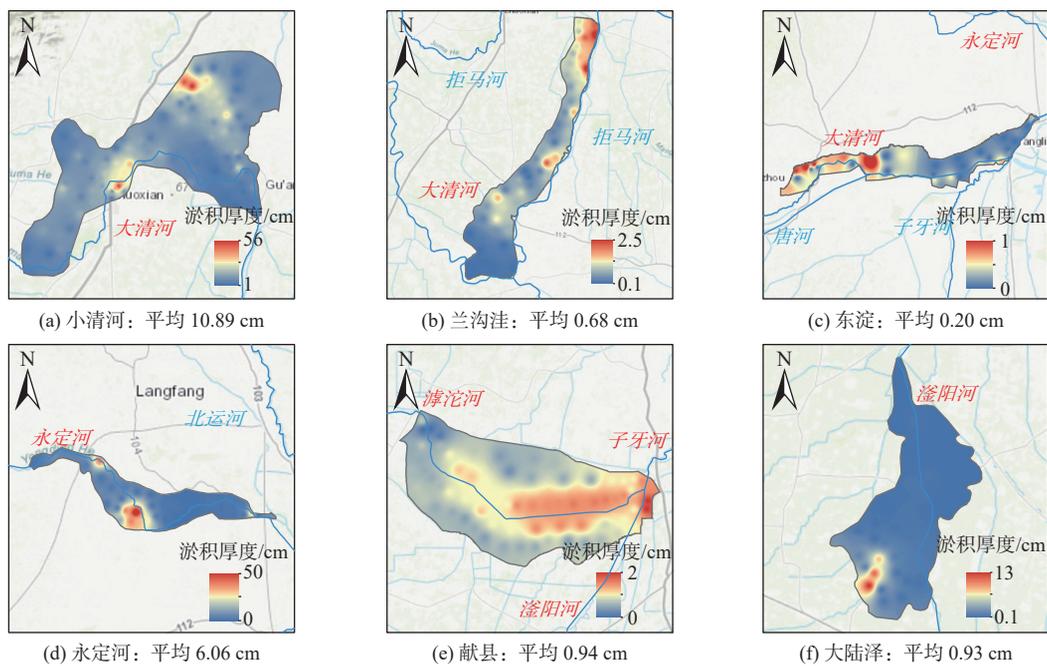


图 3 蓄滞洪区淤积厚度采样点分布

Fig. 3 Distribution of sampling points for sediment deposition thickness in flood detention areas



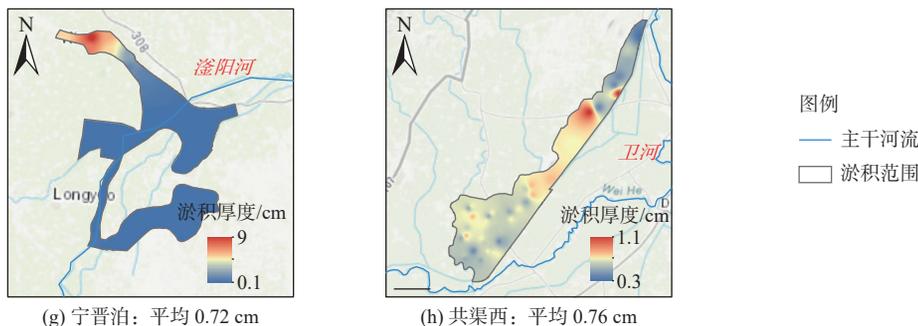


图4 研究区淤积厚度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of sediment deposition thickness in the study area

结合野外调查淤积厚度,进行精度验证 [图5(a)], 得到的拟合曲线方程为

$$y = 0.48 + 0.82x$$

式中: y 为实际淤积厚度, cm; x 为淤积厚度插值结果, cm。得到决定系数 R^2 为 0.82, $p < 0.001$, 均方根误差 E_{RMS} 为 1.32, 纳什系数 E_{NS} 为 0.78, 表明淤积厚度空间分布结果与实地调查数据之间具有较强的线性

关系, 并且结果和实际结果相差较小, 拟合效果较好。随机选择不同数量的调查点进行插值, 并绘制决定系数 R^2 与调查点密度关系 [图5(b)]。可以发现, 调查点密度是淤积厚度反演精度的主要影响因素, 调查点密度越高, 反演结果与实际结果之间的误差越小, 并且 R^2 在本研究调查点密度(0.23 个/ km^2)已经趋于稳定, 表明反演结果精度良好, 可以用于后续分析。

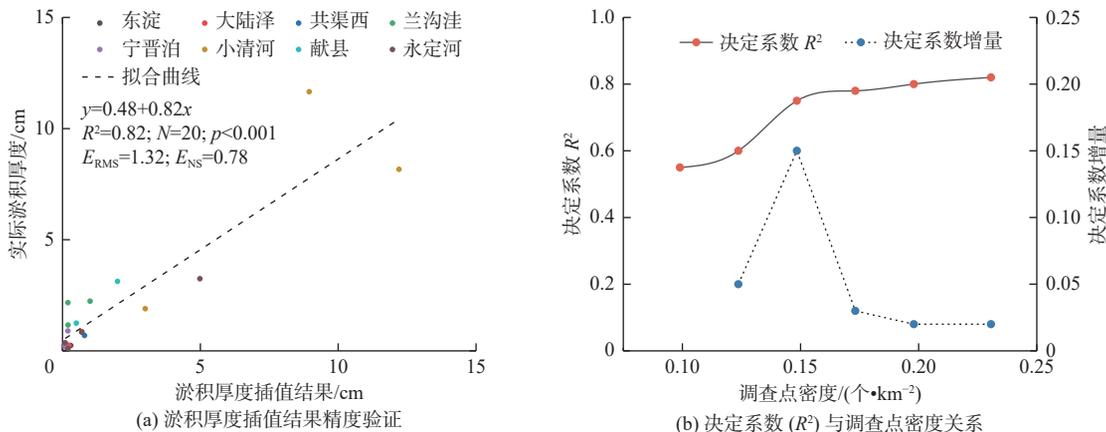


图5 淤积厚度插值结果精度验和决定系数 (R^2) 与调查点密度关系

Fig. 5 Verification of sediment deposition thickness interpolation results and the relationship between R^2 and the density of investigation points

在大清河水系和滹沱河水系, 上游蓄滞洪区的平均淤积厚度普遍大于下游蓄滞洪区。具体来说: 小清河蓄滞洪区位于大清河系上游, 其平均淤积厚度达到了 10.89 cm; 下游的兰沟洼和东淀蓄滞洪区, 其平均淤积厚度逐渐减小, 分别仅为 0.68 和 0.20 cm。在滏阳河系中, 洪水首先进入大陆泽蓄滞洪区, 然后进入宁晋泊蓄滞洪区, 因此大陆泽的平均淤积厚度稍大于宁晋泊蓄滞洪区, 两地分别为 0.93 和 0.72 cm。

在海河流域北部靠近山地丘陵的蓄滞洪区, 淤积厚度平均值高于其他地区。小清河和永定河蓄滞洪区分别位于北京西南部和河北西北部山地丘陵区, 其淤积厚度相对其他蓄滞洪区更大, 平均值分别达到 10.89 和 6.06 cm。相比之下, 其余蓄滞洪

区由于距离山地丘陵区较远, 淤积体厚度普遍较小, 平均值均低于 1 cm。

2.2 蓄滞洪区淤积调查结果

根据淤积厚度空间分布, 结合实验室测得的淤积体密度 (1.46 t/m^3), 得到蓄滞洪区淤积体积和淤积量 (表 2)。经统计, 整个研究区的平均淤积厚度为 2.60 cm, 总淤积面积为 $2\,020.77 \text{ km}^2$, 占蓄滞洪区总面积的 51.5%, 最大的 3 处蓄滞洪区的淤积面积占据了全部淤积面积的 51.8%。特大洪水造成了大面积淤积, 多数蓄滞洪区的淤积面积占其总面积的比例超过 50%。东淀淤积面积最大, 为 369.84 km^2 ; 其次是宁晋泊和献县, 分别为 351.98 和 325.77 km^2 ; 共渠西淤积面积最小为 94.05 km^2 ; 其他蓄滞洪区淤积

面积均超过 150 km²。分析蓄滞洪区淤积面积占蓄滞洪区面积可知:共渠西、献县和东淀的占比最大,超过了 97%;而宁晋泊和大陆泽的占比较小,仅为 24.1% 和 27.2%。

表 2 蓄滞洪区淤积特征统计结果

Tab. 2 Statistic characteristics of sediment deposition in flood detention areas

所属水系	蓄滞洪区名称	平均淤积厚度 \bar{h}_s/cm	淤积面积 A_s/km^2	淤积面积占比/%	淤积体积 V_s/m^3	淤积量 M_s/t
大清河系	小清河	10.89	257.12	76.7	2.80×10^7	4.09×10^7
	兰沟洼	0.68	227.14	89.8	1.54×10^6	2.30×10^6
	东淀	0.20	369.84	97.6	7.40×10^5	1.10×10^6
永定河系	永定河	6.06	237.02	48.6	1.44×10^7	2.10×10^7
子牙河系	宁晋泊	0.72	351.98	24.1	2.53×10^6	3.70×10^6
	大陆泽	0.93	157.86	27.2	1.47×10^6	2.10×10^6
	献县	0.94	325.77	98.3	3.07×10^6	4.50×10^6
漳卫河系	共渠西	0.76	94.05	99.1	7.20×10^5	1.10×10^6
研究区		2.60	2 020.77	51.5	5.25×10^7	7.67×10^7

淤积体积和淤积量的空间分布特征与平均淤积厚度的分布相近,淤积体总体积达 $5.25 \times 10^7 m^3$,淤积总量为 $7.67 \times 10^7 t$ 。在平均淤积厚度最大的小清河和永定河蓄滞洪区,淤积体积均超过了 $1.0 \times 10^7 m^3$,淤积量分别为 4.09×10^7 和 $2.10 \times 10^7 t$,占整个海河流域的 80.7%。献县、宁晋泊、兰沟洼和大陆泽的淤积体积超过 $1.00 \times 10^6 m^3$,淤积量在 $2.10 \times 10^6 \sim 4.50 \times 10^6 t$ 。东淀和共渠西的淤积体积较为接近,淤积量

均为 $1.10 \times 10^6 t$ 。

2.3 蓄滞洪区洪水含沙特征

研究得到蓄滞洪区的淹没特征、蓄滞洪区利用率以及洪水含沙量,具体结果见表 3。海河流域本次特大洪水中,8 个蓄滞洪区的平均淹没深度为 2.55 m,总蓄滞洪量为 24.63 亿 m^3 ,蓄滞洪区总利用率达到了 36.9%,洪水的平均含沙量为 $31.14 kg/m^3$ 。

表 3 蓄滞洪区淹没特征及洪水含沙量

Tab. 3 Characteristics of inundation in flood detention areas and the sediment content of floods

所属水系	蓄滞洪区名称	估算蓄滞洪量/亿 m^3	实际蓄滞洪量/亿 m^3	平均淹没深度/m	设计蓄滞洪量/亿 m^3	蓄滞洪区利用率/%	洪水含沙量/($kg \cdot m^{-3}$)
大清河系	小清河	4.25	5.14	3.40	2.90	146.55	96.09
	兰沟洼	2.14	2.29	2.57	3.20	66.88	10.50
	东淀	6.39	7.87	2.67	12.90	49.53	1.72
永定河系	永定河	2.97	2.56	3.19	4.00	74.25	70.61
子牙河系	宁晋泊	3.86	6.06	2.18	26.90	14.35	9.63
	大陆泽	2.64		3.08	8.60	30.70	8.13
	献县	1.68	1.21	1.71	5.40	31.11	26.79
漳卫河系	共渠西	0.70	0.14	3.80	2.80	25.00	64.30
研究区		24.63	25.27	2.55	66.70	36.90	31.14

将本研究估算的蓄滞洪量和杜晓鹤等^[6]得到的实际值进行对比,估算蓄滞洪量与实测值的均方根误差 E_{RMS} 为 0.75,纳什系数 E_{NS} 达到 0.92,表明估算结果可靠。估算结果与王玮琦等^[13]和吴滨滨等^[3]得到的结果也比较接近,说明本研究所得淤积厚度和蓄滞洪量计算结果可靠,可以有效地模拟各蓄滞

洪区的淤积厚度空间分布和蓄滞洪量。共渠西蓄滞洪区相对误差较大,分析该区域受地面道路、建筑物等地表微地形影响^[22],导致蓄滞洪区内存在多处低洼地没有淹水的现象,与野外调查情况一致。

各地区平均淹没深度与淤积特征的空间分布不完全一致。共渠西平均淹没深度最大,达到了 3.80 m;

淤积情况最严重的小清河蓄滞洪区其次,为 3.40 m;其余蓄滞洪区的平均淹没深度则在 1.71~3.19 m,其中献县的平均淹没深度最低,仅为共渠西的 45.0%。

洪水含沙量特征与平均淤积厚度的空间分布相近,位于流域上游且靠近山地的蓄滞洪区洪水含沙量更高。小清河和永定河蓄滞洪区的洪水含沙量最高,分别为 96.09 和 70.61 kg/m³。大清河下游的兰沟洼和东淀,洪水含沙量逐渐减少,兰沟洼为小清河蓄滞洪区的 10.9%,东淀为小清河的 1.8%。献县蓄滞洪区位于滹沱河下游,洪水含沙量为 26.79 kg/m³;位于滏阳河流域中游相邻的宁晋泊和大陆泽蓄滞洪区洪水含沙量相近,分别为 9.63 和 8.13 kg/m³。卫河上游的共渠西洪水含沙量仅次于小清河和永定河蓄滞洪区,为 64.30 kg/m³,相当于小清河的 66.9%。

在蓄滞洪区利用率方面,北部地区的蓄滞洪区利用率明显高于中部和南部。北部小清河、永定河、兰沟洼和献县蓄滞洪区利用率超过 49.0%,利用率最大的小清河达到 146.6%,远超设计蓄滞洪量。流域中部和南部的大陆泽、共渠西、宁晋泊和献县 5 处蓄滞洪区利用率均在 32.0% 以下,设计蓄滞洪量高达 26.90 亿 m³ 的宁晋泊利用率仅为 14.3%。

3 讨论

3.1 蓄滞洪区淤积特征

本研究在洪水淹没范围达到最大后,解译 ZY-1F 和 GF-2 遥感影像,利用光谱特征差异提取淤积范围,据此布设调查点。研究在各蓄滞洪区基本退水后即开展调查,发现解译出的淤积范围准确性高,实际淤积情况在影像中反映清晰,所设置的调查点均位于实际淤积范围内。然而,本研究的不足之处在于未定量评价遥感反演的淤积范围和实际淤积范围的一致性。后续研究将在遥感影像解译的基础上,使用 RTK 在实地测定淤积范围,并利用重叠度等指标评价遥感反演的淤积范围和实际淤积范围的一致性。

在海河“23·7”流域性特大洪水过程中,蓄滞洪区的淤积特征分布呈现出显著的差异,位于北部或西部山地的蓄滞洪区,其淤积厚度和淤积量普遍大于流域其他蓄滞洪区。洪水中的泥沙主要由河底冲刷以及暴雨径流引起的土壤侵蚀量形成^[23]。小清河和永定河蓄滞洪区邻近北京西南部和河北西北部的山地丘陵区,该区域属于风沙和黄土地过渡区,山地坡度大,洪水强,降雨历时长,强降雨导致土壤

侵蚀模数增大^[24],水力侵蚀输移泥沙和冲刷河床产生的泥沙量大。当洪水进入蓄滞洪区后,水流速度减缓,携带的泥沙在蓄滞洪区内沉积,导致小清河和永定河的平均淤积厚度分别达到 10.89 和 6.06 cm。其他蓄滞洪区主要位于华北平原上,地势相对平缓,洪水流速和携沙能力较小,因此其淤积厚度平均值低于 1.00 cm。

蓄滞洪区的上下游关系对淤积厚度的空间分布具有显著影响。小清河、兰沟洼和东淀蓄滞洪区共同承担了大清河的泄洪任务,但各蓄滞洪区的淤积厚度却存在较大的差异,位于大清河上游的小清河蓄滞洪区厚度最大,位于下游的兰沟洼和东淀明显较小。行洪过程中,洪水经过小清河蓄滞洪区后,其洪峰流量仍然超过河道本身的行洪能力,因此需启用兰沟洼和东淀蓄滞洪区^[6]。当洪水进入兰沟洼和东淀蓄滞洪区时,水流速度已有所减缓,河流中的含沙量也有所降低,因此这两处区域的淤积情况相对较轻,平均淤积厚度仅为小清河淤积厚度的 5.6% 和 1.8%。

3.2 蓄滞洪区洪水含沙特征

在海河流域的四大干流中,蓄滞洪区利用率主要受上游洪峰流量和设计蓄滞洪量的影响。在永定河水系中,仅启用了永定河蓄滞洪区,并且该区的设计蓄滞洪量较小,因此整体的蓄滞洪区利用率较高。大清河水系的来水量较大,启用了小清河、兰沟洼和东淀共 3 处蓄滞洪区,其中小清河的蓄滞洪量甚至超过了设计标准,蓄滞洪区利用率仅次于永定河水系。子牙河水系的蓄滞洪量虽然仅次于大清河系,但该区的总设计蓄滞洪量高达 40.9 亿 m³,远超其他蓄滞洪区的设计标准,因此蓄滞洪区利用率最低,见表 4。

除此之外,大清河水系内部 3 处蓄滞洪区的利用率也受到了蓄滞洪区启用先后顺序以及上下游关系的影响。大清河系在启用小清河蓄滞洪区后,流量仍然大于预期行洪能力。因此兰沟洼和东淀蓄滞洪区相继启用,洪峰流量也逐渐下降^[6]。受此影响,3 处蓄滞洪区的利用率逐渐下降,从小清河的 146.55% 逐渐降至东淀的 49.53%。

在洪水过程中,各水系的洪水含沙量均远超过去多年非汛期的平均值。永定河水系此次洪水的含沙量为 70.61 kg/m³,远超过近 20 a 来在燕翅(0.002 0 kg/m³)和三家店(0.002 6 kg/m³)水文站的实测数据,是燕翅水文站 1963—2020 年多年平均含沙

量的 45.23 倍;大清河系的洪水含沙量为 34.66 kg/m^3 , 是近 20 a 以来漫水河水文站实测数据的 26.26 倍, 以及张坊水文站的 41.26 倍^[25]。在调查过程中也发

现,北京市房山区和门头沟区的许多路基被洪水冲毁,多处道路受洪水冲刷有基岩出露现象,该地剧烈的土壤侵蚀可能是造成洪水高含沙量的原因。

表 4 蓄滞洪区利用率与洪水含沙特征比较

Tab. 4 Comparison between the utilization rate of flood detention areas and the sediment content characteristics of floods

所属水系	蓄滞洪区名称	蓄滞洪区利用率/%	水系利用率/%	蓄滞洪区含沙量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水系含沙量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
大清河系	小清河	146.55		96.09	
	兰沟洼	66.88	67.26	10.53	34.66
	东淀	49.53		1.72	
永定河系	永定河	74.25	74.25	70.61	70.61
	宁晋泊	14.35		9.59	
子牙河系	大陆泽	30.70	20.00	8.13	12.59
	献县	31.11		26.79	
漳卫河系	共渠西	25.00	25.00	64.30	64.30

4 结论

为深入分析海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区淤积情况和洪水含沙特性,本研究开展了淤积调查。研究表明:蓄滞洪区总淤积面积达到 $2\,020.77 \text{ km}^2$, 占总面积的 51.5%, 平均淤积厚度为 2.60 cm, 淤积量则达到了 $7.67 \times 10^7 \text{ t}$; 研究区平均淹没深度为 2.55 m, 总蓄滞洪量为 24.63 亿 m^3 , 蓄滞洪区总利用率达 36.9%; 在整个研究区内, 洪水含沙量为 31.14 kg/m^3 , 大清河系和永定河系更是达到常年非汛期含沙量的 20~40 倍。研究发现地形是淤积厚度空间差异的主要影响因素, 表现为西北山地丘陵地区的淤积情况相对平原地区更为严重。同时, 蓄滞洪区的启用顺序和上下游关系也对淤积厚度的空间差异产生了影响。

在发生“23·7”流域性特大洪水后, 本研究在蓄滞洪区内开展大范围的淤积厚度和淹没情况快速调查, 获取了蓄滞洪区淤积厚度的空间分布情况, 计算得到平均淤积厚度、淤积体积和淤积量等淤积特征参数; 同时估算蓄滞洪量, 计算蓄滞洪区的利用率和洪水含沙量。本研究在应急状态下为蓄滞洪区受灾评估提供及时且准确的数据支撑。

参考文献:

- [1] 麦合木提·图达吉, 童瑞, 徐宝宁, 等. 北京“23·7”特大洪水复盘分析 [J]. 水力发电学报, 2024, 43(4): 12-22. DOI: 10.11660/slfjdx.20240402.
- [2] 刘家宏, 梅超, 王佳, 等. 北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析 [J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33

(9): 50-55. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023332.

- [3] 吴滨滨, 于汪洋, 马奉泉, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水东淀蓄滞洪区洪水演进模拟与预报 [J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(10): 37-42. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023408.
- [4] 宋文龙, 马建威, 孙亚勇, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水启用蓄滞洪区洪水淹没全过程卫星遥感监测分析 [J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(10): 31-36. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023409.
- [5] 刘军梅, 杨毅, 郭金燕, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水北京市永定河洪水调查分析及对设计洪水的建议 [J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(1): 52-57. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023433.
- [6] 杜晓鹤, 何秉顺, 徐卫红, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水蓄滞洪区运用复盘及系统治理绿色发展的思考 [J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9): 31-38. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023359.
- [7] WANG K, WANG Z, LIU K, et al. Optimizing flood diversion siting and its control strategy of detention basins: A case study of the Yangtze River, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126201. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126201.
- [8] TERCENIO D, FERNANDES L, CORTES R, et al. Flood risk attenuation in critical zones of continental Portugal using sustainable detention basins [J]. Science of the Total Environment, 2020, 721: 137727. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137727.
- [9] WANG Z, WANG Y, LIU K, et al. Theory and practice of basin-wide floodwater utilization: Typical im-

- plementing measures in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628: 130520. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130520.
- [10] 周洁,董增川,朱振业,等.基于MIKE FLOOD的洪泽湖周边滞洪区洪水演进模拟[J].*南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 56-62. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.009.
- [11] 李时,秦毅,刘强,等.基于洪灾风险管理的蓄滞洪区道路规划[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(3): 81-90. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0053.
- [12] 褚明华,穆杰,宋文龙,等.海河“23·7”流域性特大洪水防御蓄滞洪区运用关键技术[J].*中国水利*, 2023(18):19-23.DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2023.18.006.
- [13] 王玮琦,林文青,王帆,等.共渠西蓄滞洪区洪水演进数值模拟研究:以海河“23·7”流域性特大洪水为例[J].*中国防汛抗旱*, 2023, 33(9): 45-49. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023341.
- [14] 张念强,王静,李娜.洪水动态风险分析技术对防汛应急工作的支撑:以海河“23·7”流域性特大洪水期间兰沟洼蓄滞洪区运用为例[J].*中国防汛抗旱*, 2023, 33(9): 39-44. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023347.
- [15] 丁志雄.河北省涿州市“23·7”洪水模拟反演分析及思考[J].*中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(2): 121-128. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20230164.
- [16] 刘洁,杨胜发,沈颖.长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响[J].*泥沙研究*, 2019, 44(6): 33-39. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.06.006.
- [17] 方迎潮,王道杰,何松隆,等.云南东川蒋家沟泥石流 2003—2014 年冲淤演变特征 [J]. *山地学报*, 2018, 36(6): 907-916. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000386.
- [18] 叶蕾.金沙江“11·13”白格堰塞湖洪水沉积物特征及其形成机制研究[D].昆明:云南师范大学,2021. DOI:10.27459/d.cnki.gynfc.2021.000399.
- [19] 吴丽,田俊峰,汤洋,等.干旱半干旱矿区采煤裂缝对土壤水分的影响研究[J].*南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 115-120. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0066.
- [20] 蒋永健,陆颖,祁昌军,等.适用于分布式水文模拟的空间插值方法改进[J].*南水北调与水利科技*, 2019,17(6):69-74.DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0137.
- [21] 由明明,杨国兴,李春林,等.基于机载激光雷达的长龙山抽水蓄能电站库容计算[J].*人民黄河*, 2022, 44(S1): 197-198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.S1.080.
- [22] 张文婷,李祉璇,张行南,等.基于DEM的河道断面构造改进方法及洪水演进精度评估[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 563-572. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0057.
- [23] 刘成,何耘,刘桢.河流输沙量变化的主要驱动因素[J].*水利水电科技进展*, 2017, 37(1): 1-7. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2017.01.001.
- [24] 闫云霞,王随继,颜明,等.海河流域产沙模数尺度效应的空间分异[J].*地理科学进展*, 2014, 33(1): 57-64. DOI: 10.11820/dlxxjz.2014.01.007.
- [25] 何耘,林林,王学风.北京地区主要河流水沙量变化分析[J].*中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2023, 21(6): 526-536. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20230172.

Sediment deposition in the flood detention area of the "23·7" super large flood in the Haihe River basin

YANG Shengtian¹, ZHU Yifan¹, ZHOU Baichi¹, LOU Hezhen¹, DING Jianxin¹, SONG Wenlong²,
CONG Peijuan³, GONG Jiyi¹, WANG Huaixing¹, LI Jiekang¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center on Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: The catastrophic flood eventb "23·7" super large flood in the Haihe River basin resulted from a combination of meteorological and geographical factors. The residual circulation from Typhoon Doksuri, combined with subtropical high pressure and moisture transport from Typhoon Khanun, interacted with the local topography to create conditions that led to extreme rainfall. This intense rainfall event, which took place from July 28 to August 1,

2023, was the most severe since 1963, with a total accumulated area rainfall amounting to 155.3 mm. This situation led to unprecedented flooding across the region, with 22 rivers exceeding their warning levels and eight rivers experiencing the most significant floods recorded in their history. As a response to the emergency conditions, eight flood detention areas within the basin were activated, resulting in significant sediment deposition. This, in turn, severely impacted both agricultural production and daily life in these regions.

In order to investigate and evaluate the sediment deposition characteristics within the flood detention areas following the event, a comprehensive study was conducted. This study was distinguished by its use of advanced technologies, including satellite remote sensing, drone imagery, and ground surveys, which were carried out on August 29, 2023. Remote sensing images acquired from ZY-1F and GF-2 satellites were meticulously interpreted to identify the extent and characteristics of sediment deposition within the eight flood detention areas. Additionally, field surveys were conducted to obtain precise measurements of sediment thickness, volume, and mass within these areas. The maximum inundation depth was determined using flood mark measurements, and from these measurements, the average inundation depth, flood storage capacity, utilization rate, and sediment concentration were calculated. The sediment thickness and concentration calculations' reliability and accuracy were assessed using the Root Mean Square Error (E_{RMS}) and Nash-Sutcliffe Efficiency (E_{NS}) metrics. The integration of field data and remote sensing technology facilitated a detailed analysis of the spatial distribution of sediment deposition and the dynamics of the flood across the affected regions.

The study's results revealed that the spatial interpolation of sediment thickness achieved a E_{RMS} of 1.32 and a E_{NS} of 0.78, demonstrating both the feasibility and reliability of the calculation methods employed. The flood storage calculation yielded an E_{RMS} of 0.75 and an E_{NS} of 0.92, further confirming the accuracy and validity of obtained results. Collectively, the eight flood detention areas stored a total flood volume of 2.463 billion m^3 , achieving a utilization rate of approximately 36.90%. The average sediment deposition thickness across areas was found to be 2.60 cm, resulting in a total sediment mass of 7.67×10^7 t. During flood event, the average sediment concentration was calculated to be 31.14 kg/m^3 in the Haihe River basin. Notably, in the Daqing River and Yongding River systems, sediment concentrations reached levels that were 20 to 40 times higher than the average recorded over the past 20 years.

The study also exhibited that the spatial distribution of sediment deposition was significantly influenced by both the timing and sequence of flood detention area activation and the upstream-downstream relationship within the basin. Sediment deposition was more severe in the western and northern mountainous regions of the Haihe River basin, where topography played a crucial role in the observed spatial variations. The detention areas located in the upper reaches, which were activated earlier during the flood event, exhibited higher sediment deposition compared to other areas. This comprehensive assessment provides valuable data and insights for evaluating the impact of the "23·7" flood event. The study underscores the critical importance of enhancing the management and utilization of flood detention areas to mitigate potential flood risks in the future. It emphasizes the integration of remote sensing and field methods to enable rapid and accurate post-disaster assessments of sediment deposition and flood impacts, thus providing essential support for disaster response and management efforts.

Key words: "23·7" regional super large flood; Haihe River basin; flood detention area; sediment deposition