第62卷第4期
2022年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 62, No. 4
July 2022

文章编号：1000-8608(2022)04-0378-08

黄河下游丁坝群对河势控制效果研究

彭秀竹[1]，徐向舟[*1]，赵　莹[2]，高　璐[1]

（1.大连理工大学 水利工程学院，辽宁 大连　116024；
2.山东省水利科学研究院，山东 济南　250013）

摘要：下游游荡型河道的河势控制是黄河流域生态保护与高质量发展的重要内容.利用MIKE21软件构建黄河下游天然河道二维水动力数值模型，并用控制变量法，对比分析不同挑角、布设排数以及结构形式下丁坝群对河势的控制效果.结果表明，在黄河下游河湾段透水丁坝群的缓流落淤效果与实体丁坝群接近.实体丁坝坝后悬沙浓度从约30 kg/m^{3}下降到最低24.72 kg/m^3，透水丁坝则下降至24.08 kg/m^3；两者对河段凹岸流速减小平均贡献率均高达80%以上，具有很强的护岸效果.此外透水丁坝因其独具的透水性能，有利于水生生物繁衍生息，兼顾了防洪安全和生态友好.但因目前建造透水丁坝的配套理论与技术标准有所欠缺，工程中存在溃坝风险，因而需要进一步加强设计方法和工程新材料的研发.

关键词：游荡型河道；丁坝群；河势控制；悬沙浓度；数值模型

中图分类号：TV85　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.7511/dllgxb202204006

0　引　言

黄河下游河道不断迁徙变化，在一定条件下就会决溢泛滥，改走新道.2019年国家将黄河流域生态保护和高质量发展放在战略高度，明确要求实施河道和滩区综合提升治理工程.随着小浪底水库调水调沙的运用，下游河道的水沙条件发生了变化，原有的工程布置已经不能满足当前河道治理情况，尤其是部分靠溜工程的上首坍塌严重，致使主溜超出工程控制范围，这对防汛抢险十分不利，需要加快开展游荡型河段控导工程的续建.然而河道整治工程的设计按照原控导工程确定是否合理，目前还缺乏必要的技术论证.鉴于黄河下游本身水沙特性的复杂性以及相关研究的缺乏，有必要开展整治工程对黄河下游游荡型河道影响的研究.

丁坝的布设和结构形式的选择直接关系到河道的治理效果.已有研究通过模型试验和数值计算等方法，分析了丁坝对河道中流体特性的影响，相关成果大多聚焦在速度分布[1]、自由水面形态和紊动特性[2-3]等方面，比如已有许多学者根据模型试验和数值模拟分析了单丁坝挑角[4]、长度[5]和坝型[6]等对流场及冲刷的影响.以往对丁坝的研究多是针对单丁坝某一具体问题深入分析，很少有把丁坝群当作整体研究对象来考虑.事实上，单丁坝对河道整治有局限性，现实大多采用丁坝群系统配合作用，在避免产生新水害的同时，还可以达到河道整治的目的.加之弯道处坝体作用下的水流、泥沙和河床的相互作用机理复杂，因此仍需对河湾处坝群周围水流特征和河床变形进行更加深入的分析，从而验证丁坝群在缓流落淤、保护岸坡等方面的效果，以寻求具有显著防洪效益的护岸方式.此外，以往对丁坝周围流动特性的研究多集中于顺直河道[5]，而黄河下游为游荡型河道，河湾段水沙作用机理复杂，在讨论丁坝群效用机制时难以直接应用现有成果.鉴于此，本文运用MIKE21软件，构建黄河下游浑水条件下典型游荡型河道的二维水动力数值模型，对比分析在不同挑角、布设排数和结构形式情况下，丁坝群对游

收稿日期：2021-09-15；　**修回日期：**2022-03-30.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51879032)；国家重点研发计划项目(2016YFC0402504)；水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2019HLG02).
作者简介：彭秀竹(1996-)，女，硕士生，E-mail：pengxiuzhu@mail.dlut.edu.cn；徐向舟*(1969-)，男，教授，博士生导师，E-mail：xzxu@dlut.edu.cn.

荡型河道平面河势的控制效果，为丁坝设计施工提供参考，以期为黄河下游工程布局提供科学思路.

1　区域概况

全长约 275 km 的孟津至高村河段，位处黄河下游. 该河段是典型的游荡型河段，河势摆动剧烈，易冲易淤，滩槽泥沙交换过程复杂. 而老君堂河段整个位于游荡型河段中，在山东省东明县黄河南滩内. 1974 年开始在该河段修建老君堂控导工程，上接左岸周营口工程来溜，下送溜至榆林工程. 从老君堂河势变化发展来看，如果工程对滩岸滩尖在大溜作用下，淘刷严重，继续坍塌，滩嘴将掉落，主流有进一步下滑的趋势，届时工程下首丁坝将会进一步出险和右岸滩岸坍塌加剧. 为防止河势继续下滑，使老君堂工程发挥应有的迎溜送溜作用，维持目前河势，计划修建老君堂下延工程(图 1).

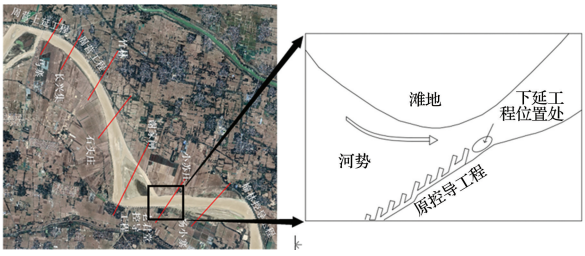


图 1　研究区域

Fig. 1　Study area

2　数值模拟

2.1　模型计算范围和数据来源

本次数学模型的计算运用 MIKE21 软件，建立基于非正交网格的老君堂附近典型天然河道二维水动力数值模型. 计算范围上起马寨断面，下至杨小寨，涵盖整个老君堂河段，河段总长 12 km，如图 1 所示. 模型应用的是 2017 年黄河下游干流河道地形图数据，并在此基础上添加了黄河水文勘测局对黄河下游老君堂河段实测的 7 个汛前断面数据. 河道中原有控导工程地形采用不过流边界形式处理. 利用网格生成器对计算河段进行非结构化、结构化网格划分，大部分采用三角网格，为了保持工程前后边界的顺直，在拟建工程的区域采用四边形网格，并且进行网格加密处理. 模拟河段共剖分了 12 207 个网格点.

2.2　模拟试验方案

模型的边界条件按照河道治理设计的水文部分，进口边界条件选择进口总流量，设计流量 4 000 m^3/s，设计含沙量 30 kg/m^3[7]，出口边界水面高程为 63 m. 本文采用控制变量法，以布设排数为变量设计了 1、3、5 排 3 种方案；以挑角为变量设计了 30°、45°、75° 3 种方案. 以原有的整治工程设计方案作为制订试验方案的基本依据，均为下挑实体丁坝，丁坝布设在河湾凹岸(图 1 圈画部分)，尺寸按照原控导工程设置，坝长约 100 m，坝间距约 1 倍坝长，坝顶高程为 4 000 m^3/s 流量水位+0.5 m. 在此基础上，确定最佳布设方案，选取合理且相同的平面布设方式，对实体丁坝和透水丁坝进行数值模拟. 其中透水丁坝透空率选择为 30%，结构型式见图 2，其他设置与实体丁坝相同. 同时为了定量分析实体丁坝与透水丁坝对凹岸的缓流效果，引入流速减小贡献率这一概念，定义如下：

$$K=(|v_q-v_z|/v_z)\times 100\% \tag{1}$$

式中：v_q 为无坝时测点流速，v_z 为设置丁坝后的测点流速.

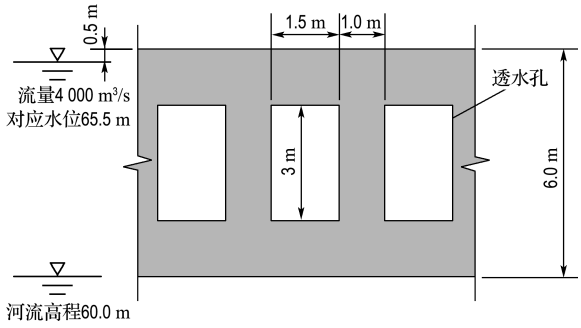


图 2　透水丁坝立面示意图

Fig. 2　Elevation schematic of permeable spur-dike

采用相对标准偏差对丁坝坝区上下游断面流速进行均匀性分析. 相对标准偏差计算公式如下：

$$C_v=\frac{S}{\bar{v}}\times 100\% \tag{2}$$

$$S=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(v_j-\bar{v})^2} \tag{3}$$

式中：C_v 为流速均匀性值，S 为标准偏差，v_j 为第 j 个采样点的速度，$\bar{v}$ 为所有采样点的平均速度，n 为采样点个数.

3 试验结果

3.1 实体丁坝不同挑角对流场的影响

挑角与有效坝长直接相关,其影响河道自由水面和流态稳定.因此合理选择挑角对矫正河势和维护工程安全起着关键作用.本文模拟了单排实体丁坝不同挑角下河势变化情况,选取实体丁坝坝轴线上下游 20 m 处典型断面作为水位和流速的提取断面,具体位置见图 3.实体丁坝周围河势变化情况如表 1 所示.从表 1 可以看出,丁坝上游断面水位升高,随着挑角的增大,水位壅高均值增大.当丁坝挑角为 75°时,水位壅高均值达到最大值 1.388 m,同时流速均匀性指标值 C_v 也达到 3 种角度中的最大值 0.418.C_v 越大,流速分布的均匀性越低.证明此挑角工况下,断面流速变幅最大,水流动能和势能之间转化频繁.在丁坝下游均发生跌水现象.下游 C_v 随着挑角的增大逐渐减小,与上游变化正好相反.挑角为 30°时,下游断面流速变化相对活跃.由此可见,河湾处水沙机理复杂,在不同的断面处,丁坝周围的流速变幅随挑角变化的规律不可一概而论.从水流本身特性来看,丁坝的存在致使原有河道过水面积突然减小,打破了水流的畅行,使水流流速重新分布.由于丁坝的束窄作用,流速在丁坝断面处陡增.水流受到惯性作用影响,绕过坝头后过流断面进一步收缩,流速继续增大.同时流速变化必然引起水流势能与动能的转化[8],水流过坝时势能转变为动能,表现为坝后跌水.综合上下游断面的流速均匀性指标值来看,在下挑角为 45°时,区域内流速最为稳定,水流的动势能转化较弱,从而对坝基安全构成的威胁也降至最小.

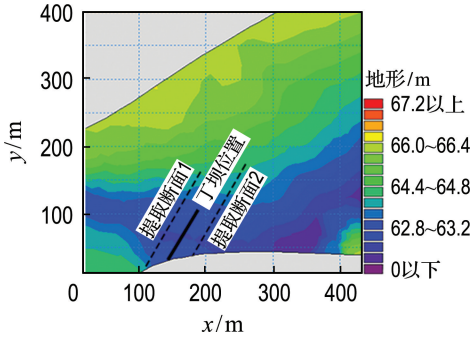


图 3 典型断面所在位置

Fig. 3 Positions of the typical segments

表 1 不同挑角下实体丁坝上下游流态变化情况

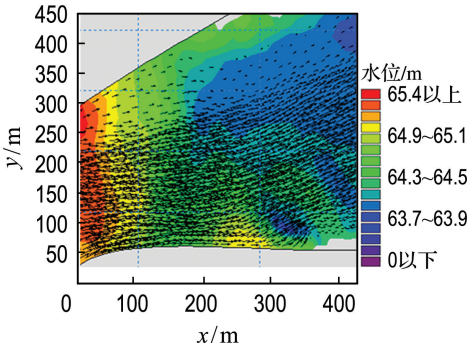
Tab. 1 Change of the flow regime in the upstream and downstream of the solid spur-dike with different oriented angles

挑角/(°)	壅高均值/m	坝前壅高变化			跌水均值/m	坝后跌水变化		
		最大壅高/m	最小壅高/m	C_v		最大跌水高度/m	最小跌水高度/m	C_v
30	0.568	2.031	−0.553	0.342	0.920	1.229	0.719	0.516
45	1.013	2.074	0.365	0.350	0.992	1.345	0.718	0.514
75	1.388	2.105	0.781	0.418	1.116	1.453	0.905	0.448

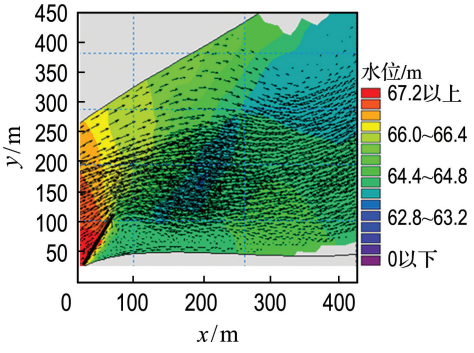
3.2 实体丁坝不同布设排数下的挑流效果

单丁坝对凹岸的防护作用有限,丁坝群的配置较单丁坝在挑离凹岸高速流团、增加凹岸低流区方面有更为优异的工作效果.本文模拟的是 45°挑角下不同布设排数下的挑流情况.由图 4 可知,在没有布设丁坝时,流线整体靠近凹岸,容易造成凹冲凸淤,河湾迅速向下移发展,使河道更加弯曲.在单排丁坝的作用下,散乱在凹岸的流线逐渐集中在河道中央,在坝前发生明显转向,绕过坝头而下,部分沿坝头转向的水流逆流而上形成一定的回流区.主流绕过坝头一定距离后流线又开始向凹岸扩散.随着丁坝排数的增加,扩散的主流线会重新聚集起来,归顺于主河道,从而减轻对凹岸的冲刷.

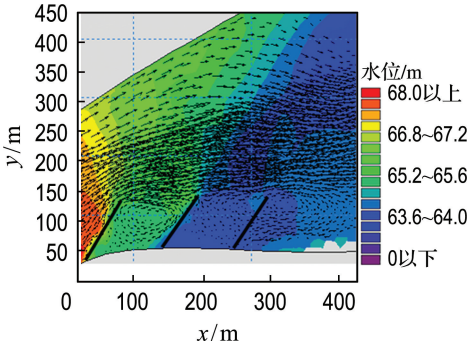
在河湾段设置丁坝后,其挑流作用发挥,将冲击凹岸的高速水流挑离至河道中心区域冲刷河道,整体高速流往凸岸偏移,靠近凸岸的淤积泥沙得以被冲刷.图 5 是丁坝作用区的流速云图,其中流速指沿水深平均值.从中可以直观地看出,在没有设置丁坝之前,红色区块的高速流团直击凹岸,严重威胁河岸安全.在设置丁坝之后,高速流区(红色部分)向河道中心偏移,并且随着排数的增加,偏移的效果愈加明显,同时靠近凹岸的低流区面积也随之增加,说明坝后保护区的范围随排数增加呈扩大趋势.另外值得一提的是,丁坝排数虽然增加,但是冲击坝头的最大流速却降低.在单排丁坝作用下,冲击坝头最大流速为 7 m/s,3 排丁坝的情况下最大流速为 6.5 m/s.可以反映出,较单丁坝而言,丁坝群体作用可以延长工程使用年



（a）排数为 0



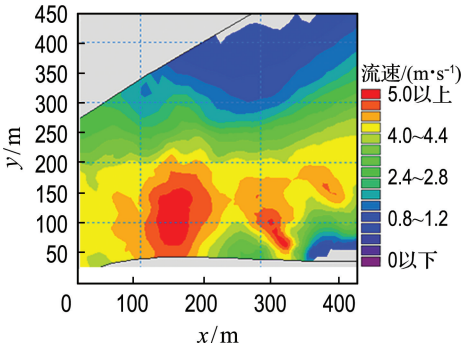
（b）排数为 1



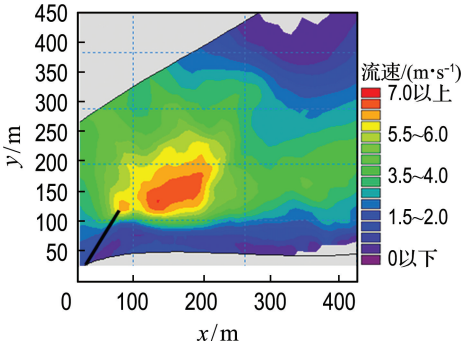
（c）排数为 3

图 4　实体丁坝周围流线分布

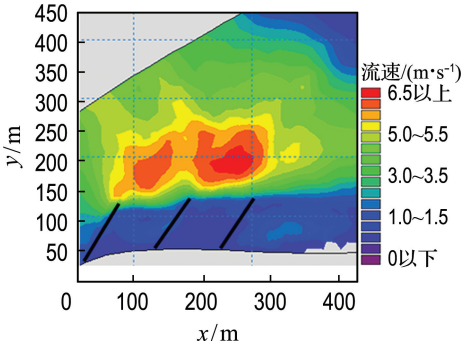
Fig. 4　Distribution of the streamlines around the solid spur-dikes



（a）排数为 0



（b）排数为 1



（c）排数为 3

图 5　实体丁坝周围流速云图

Fig. 5　Velocity nephogram around the solid spur-dikes

限，减轻水流对坝头的冲刷，工程整体工作更具安全性.

3.3　实体丁坝与透水丁坝应用模拟及对比分析

实体丁坝与透水丁坝对于河道断面水位 h 的影响效果相似，程度不同. 模型按照挑角为 45°，排数 $p=5$ 布设，水文要素的提取断面布置在丁坝群上下游各 20 m 处，见图 6. 如图 7 所示，横坐标 l 为距右岸距离，丁坝上游的横向水面线雍高明显，凹岸水位雍高程度略大于凸岸，整体横向水面线呈现凹岸高凸岸低的走势；水流绕过坝体后出现跌水现象，下游横向水面线降低，坝后水深较浅，尤其是对于实体丁坝，坝后水位降低更加明显. 可以看出相对于实体丁坝，透水丁坝在补充坝后水量这方面效果显著，透水丁坝坝后水深较实体丁坝高 0.8 m 左右. 出现上述水流现象的原因可能是：在凹岸设置丁坝之后，局部水面条件被改变，阻断了部分水流过流，出现滞留壅阻现象，导致丁坝上游水位升高；另一方面，丁坝不同的结构形式会对横断面上水面线的变化造成一定程度的影响. 由于坝身的透水性，上游水流能通过坝间空隙对坝后水量进行持续补充，普遍增加了水流过坝后的凹岸水深，从而有效改善了坝后水深[9]，水流从上游往下更为平缓地过渡. 本研究结果符合

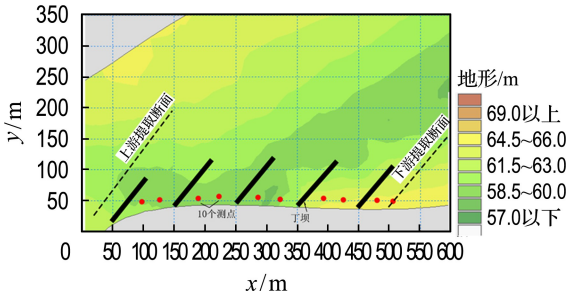
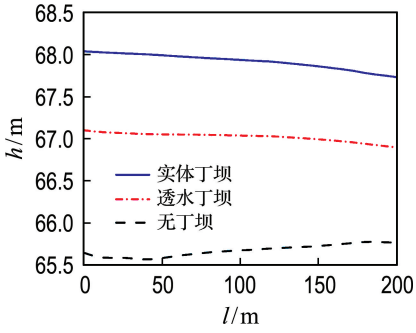
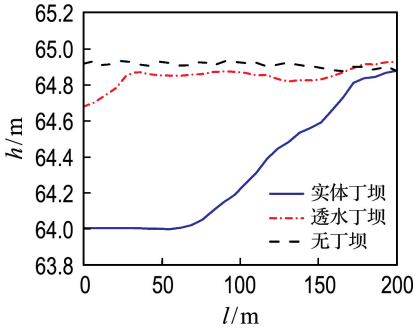


图 6 典型断面和测点所在位置

Fig. 6 Positions of the typical segments and measuring points



(a) 上游断面

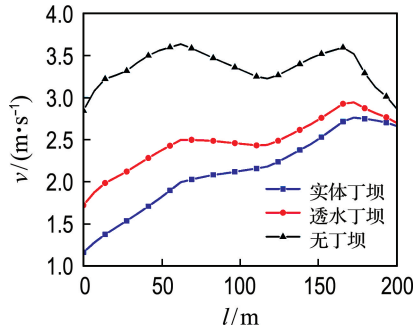


(b) 下游断面

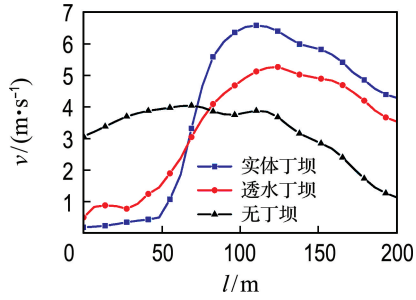
图 7 丁坝上下游断面水位变化

Fig. 7 Change of the water level in the upstream and downstream of the spur-dikes

文献[9]中物理模型试验所示现象. 图 8 展示的是丁坝上下游断面上的流速分布情况,其中某点流速是指沿水深的平均值. 在上游断面处,无论是布置实体丁坝还是透水丁坝,流速同原河道相比均减小,并且在右岸流速减小的幅度更大,在远离丁坝的一侧流速逐渐一致. 在下游断面的坝根、坝身附近,流速均在 1 m/s 以下. 坝头附近,流速陡增,实体丁坝相邻点流速最大增幅为 69.7%,透水丁坝为 60%. 总体来看,透水丁坝周围的流场更为平缓,水流流态也更好,有利于工程寿命的延长.



(a) 上游断面



(b) 下游断面

图 8 丁坝上下游断面流速变化

Fig. 8 Change of the surface velocity in the upstream and downstream of the spur-dikes

丁坝的存在不仅影响河势,同时也影响着含沙量的重新分配. 图 9 展示了浑水条件下两类丁坝在工作时刻,坝群周围的悬沙浓度 ρ 分布情况,其中悬沙浓度代表的是沿水深的平均值. 坝区的含沙量明显低于主河道内的含沙量. 从坝区至主流区,实体丁坝泥沙浓度最大变化幅度为 35.5%,透水丁坝为 30.3%. 同原河道相比,设置两种类型丁坝后,坝后泥沙均得到很大程度的淤积,实体丁坝坝后含沙量从约 30 kg/m³ 下降到最低 24.72 kg/m³,透水丁坝则下降至 24.08 kg/m³. 而凸岸和主河道淤积的泥沙被冲刷,悬沙浓度增加,这种悬沙浓度的重新分配情况表征了布设丁

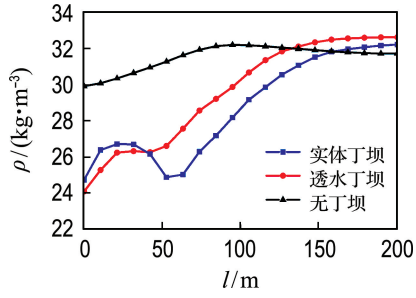


图 9 丁坝群附近悬沙浓度分布

Fig. 9 Distribution of the sediment concentration near the spur-dike group

坝之后，河湾段不再处于凹冲凸淤、河岸下移的不利情势. 根据丁坝调整的流路，河湾段会逐渐恢复到顺直的有利状态. 泥沙浓度变化趋势与已有的一项插板透水丁坝分流分沙模拟研究中的变化趋势一致[10]，进一步验证了模拟结果的可靠性.

4　结果讨论

4.1　挑角和排数对实体丁坝导流影响机理分析

单丁坝的河道整治效果有局限性，在实际治理中丁坝大多以丁坝群或者双丁坝的形式出现. 从本文中的单丁坝与坝群的挑流效果对比图(图 4、5)可以直观看出，丁坝群发挥的作用并非是单丁坝作用的简单累加. 在单丁坝的挑流作用下，原本贴近河岸的水流被束窄，集中到河道中央. 随着过坝后过流面积增大，水流以抛物线形式扩散，再次流落到河岸边继续冲刷. 而当丁坝群作为系统工作时，水流先被第一座丁坝挑离开河岸偏向河道中间一定范围，流线还未扩散至河岸又在第二座丁坝的作用下被二次挑流，水流再次向河道中心聚拢，循环往复直到尾坝发挥完作用. 由于前排的丁坝往往为后排的丁坝提供“掩护”，合理分担水势，所以丁坝群坝头受冲刷强度不如单个丁坝作用时强烈. 丁坝的挑角关系到坝面的迎冲强度，也间接决定了河床的束窄程度. 已有研究经过模型试验，通过对不同挑角下丁坝附近水流结构分析认为：挑角越大，丁坝对水流的挑流作用越强烈，在坝头附近的流速变幅越大，同时坝头旋涡强度也越大，且在 30°挑角时水流最为稳定[11]. 本文分析发现在不同的断面位置，流速分布的均匀性随挑角增大的变化规律不一致. 在上游断面，流速均匀性随挑角的增大而减小，30°最稳定；在下游断面随挑角的增大而增大，75°最稳定. 可以从以下两方面来解释产生差异的原因：(1)所述的模型试验[11]是基于顺直河道，而本文研究的是黄河下游游荡河道，河湾处水流流态和水力条件十分复杂. (2)模型试验观察的是限于坝头处的流速变幅，而本文是针对丁坝上下游作用区. 不过结合实际工程经验，建议丁坝的挑角均设计为下挑 45°为宜.

4.2　丁坝群透水性对缓流落淤的影响

图 10 展示的是应用实体丁坝和透水丁坝后凹岸的流速状态，测点处的流速是指沿水深平均值，具体测点位置见图 6. 从图 10 中可以看出丁坝发挥挑流作用，致使凹岸流速大幅度降低，起到护滩保堤的作用，降低了高速水流在离心力作用下对凹岸造成的强烈冲刷. 实体丁坝对河段凹岸流速减小平均贡献率为 85%，透水丁坝为 84%，两者对凹岸都具有很显著的缓流效果，实体丁坝的缓流效果略好一些. 不过通过改变透水丁坝的透水率和透水孔数，可以接近甚至超过应用实体丁坝时所达到的缓流效果. 而且两者在促进坝后落淤方面的效果也很接近，沉积的泥沙不仅为坝体提供支撑，也在一定程度上填补了凹岸的形态空缺，逐渐“裁湾”，抑制河道凹岸继续下滑趋势. 通过对比分析两者的模拟试验结果发现，在黄河下游河湾段应用透水丁坝群的缓流落淤效果与实体丁坝群基本相同，并未因部分透水而使其治理效果减弱. 从理论上来说，只要透水丁坝的透水率不是太大，两者的治理效果也不应该相差过大. 究其原因是整治工程的控导作用主要取决于水流动力条件和工程的边界条件. 前者主要包括流量、入流角等因子，后者则包括工程的长度、平面形式、消能大小等[12]. 由于控制变量，在模型设置中，实体丁坝和透水丁坝有差异的仅是平面形式，导致消能大小有所不同. 实体丁坝通过水流撞击密闭平面消能，透水丁坝通过透水孔减少工程前大河流量，其作用同样降低水流动能. 因此可推论，只要透水率不是大到使大河流量锐减的程度，两者的治理作用应该是相近的. 反观透水丁坝因为它的透水性，能维持水沙的纵向交换，更加符合柔性的生态调节原则，且不影响洪水过流，更加贴近自然调节的管理理念.

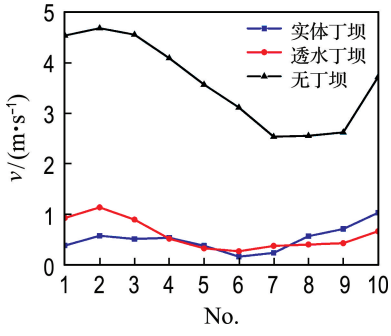


图 10　凹岸测点流速

Fig. 10　Velocity at measuring points near the concave bank

4.3　需要注意和改进的问题

自 20 世纪 70 年代以来，透水丁坝因其良好的适应性和功能性已经广泛应用于河道治理、工程防护等诸多领域[13]. 其主要形式有水力插板透水丁

坝、井柱网格透水丁坝、钢筋混凝土透水桩坝和井柱钢丝笼坝等.其中钢筋混凝土透水桩坝在近几十年黄河下游河道整治工程中的应用逐渐增多,如河南段东安工程和韦滩工程等.然而钢筋混凝土透水桩坝存在易断桩、易冲毁、施工质量难以把控等缺陷.例如2021年4月东安控导单排透水桩坝在经过水流顶冲后,工程中间冲毁80 m以上.东安工程的水毁问题说明目前亟须寻找可靠的设计方法满足工程安全性的需求.透水丁坝在设计和施工技术方面存在相关规范较少的问题,为了使其设计和施工达到标准化,需要制定透水丁坝的工程设计指南以及施工技术规范,并且对透水丁坝的水流特性、冲淤特性和稳定性计算等进行更加深入的研究.另一方面,为了深入贯彻落实生态文明建设的理念,加强流域生态保护,迫切需要对河道工程进行仿生态改造结构形式与新材料的相关研究,在满足防洪需求坝型的基础上,分析有利于水生生物繁衍生息的河道工程材料和结构.并且要求合理选择坝址,利用冲淤环境,为水生动植物创造良好的生境条件.今后研究将向构建生态友好型透水丁坝发展,寻找这种兼顾防洪安全与生态友好的建设措施.

5 结 论

(1)挑角直接影响丁坝周围自由水面及断面流速分布的均匀性.在丁坝上游断面,挑角为75°时,水位变化最大,坝前雍高1.388 m,此时流速分布的均匀性也最差.但在下游断面却是挑角为30°时流速分布的均匀性最差.由于河湾处水沙机理复杂,综合上下游断面的流速均匀性指标值来看,在下挑角为45°时,区域内流速分布最为稳定,水面的流态较缓,对岸基的动态压力相对较小,对河湾能起到更为理想的防护作用.

(2)较单丁坝而言,坝群具有更优的送溜挑流效果,坝群的存在能将冲击凹岸的高速水流挑离至河道中心,保护岸线.丁坝群体作用可以延长工程使用年限,减轻水流对坝头的冲刷.单丁坝作用下冲击坝头流速最大可达7 m/s,而群体作用下最大流速为6.5 m/s.因此适宜的排数不仅能有效控制河势,也有利于提高坝群整体的安全性能.

(3)在黄河下游河湾段应用透水丁坝群的缓流落淤效果与实体丁坝群相差不大.实体丁坝坝后悬沙浓度从30 kg/m^{3}下降到最低24.72 kg/m^3,透水丁坝则下降至24.08 kg/m^3;两者对河段凹岸流速减小平均贡献率均高达80%以上,具有很强的护岸效果.此外透水丁坝因为其独具的透水性能有利于水生生物繁衍生息,兼顾了防洪安全和生态友好,具有广阔的发展前景.

参考文献:

[1] 高桂景,王平义,杨成渝,等.丁坝附近水流动能分布研究[J].水运工程,2007(11):75-79,119.
GAO Guijing, WANG Pingyi, YANG Chengyu, *et al*. Distribution of pulsation kinetic energy of flow around spur dike [J]. **Port and Waterway Engineering**, 2007(11): 75-79, 119. (in Chinese)

[2] 崔占峰,张小峰,冯小香.丁坝冲刷的三维紊流模拟研究[J].水动力学研究与进展A辑,2008,**23**(1):33-41.
CUI Zhanfeng, ZHANG Xiaofeng, FENG Xiaoxiang. Numerical simulation on scour around spur-dike by 3D turbulent model [J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2008, **23**(1): 33-41. (in Chinese)

[3] 邓绍云,王义刚,邱清华.非淹没丁坝三维绕流数值模拟[J].水运工程,2010(6):90-94.
DENG Shaoyun, WANG Yigang, QIU Qinghua. 3D-circumferential flow value simulation to an unsubmerged spur dike [J]. **Port and Waterway Engineering**, 2010(6): 90-94. (in Chinese)

[4] 陆 晶,倪丁凡,刘亚威,等.挑角对淹没丁坝附近河床变形影响的试验[J].武汉大学学报(工学版),2015,**48**(1):11-14.
LU Jing, NI Dingfan, LIU Yawei, *et al*. Experimental study of effects of spur-dike angle on local river bed deformation near a submerged spur-dike [J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2015, **48**(1): 11-14. (in Chinese)

[5] 张 岩,吴伊平,崔鹏义,等.丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2019,**30**(1):164-170.
ZHANG Yan, WU Yiping, CUI Pengyi, *et al*. Numerical simulation for the effect of spur dike lengths on the hydraulic characteristics of the bend [J]. **Journal of Water Resources and Water Engineering**, 2019, **30**(1): 164-170. (in Chinese)

[6] KUHNLE R A, ALONSO C V, SHIELDS F D. Local scour associated with angled spur dikes [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, **128**(12): 1087-1093.

[7] 张原锋,刘晓燕,张晓华.黄河下游中常洪水调控指标[J].泥沙研究,2006(6):1-5.
ZHANG Yuanfeng, LIU Xiaoyan, ZHANG Xiaohua. Regulation indexes of the medium flood in the Lower Yellow River [J]. **Journal of Sediment Research**, 2006(6): 1-5. (in Chinese)

[8] 王家琪，徐霖玉，张　哲，等. 丁坝挑角对弯道防护的影响 [J]. 水利科技与经济，2015，**21**(3)：36-39.
WANG Jiaqi，XU Linyu，ZHANG Zhe，*et al*. The influence of groin angle on corners protection [J]. **Water Conservancy Science and Technology and Economy**，2015，**21**(3)：36-39. (in Chinese)

[9] 许百强，喻　涛，王平义，等. 长江上游透水丁坝水面线分布试验研究 [J]. 水利水运工程学报，2019(5)：62-68.
XU Baiqiang，YU Tao，WANG Pingyi，*et al*. Experimental studies on flow profile of permeable spur dikes in upper reaches of Yangtze River [J]. **Hydro-Science and Engineering**，2019(5)：62-68. (in Chinese)

[10] 毛　亮，李玉建，周正平，等. 插板透水丁坝分流分沙影响因素数值模拟 [J]. 人民长江，2021，**52**(9)：216-222.
MAO Liang，LI Yujian，ZHOU Zhengping，*et al*. Numerical simulation on influence factors of flow and sediment diversion of permeable sheet piling spur dike [J]. **Yangtze River**，2021，**52**(9)：216-222. (in Chinese)

[11] 王燕燕，刘焕芳，王　振. 护岸式铅丝笼丁坝挑角的选择 [J]. 人民黄河，2013，**35**(7)：9-11，14.
WANG Yanyan，LIU Huanfang，WANG Zhen. Oriented angle selection of gabion groin for bank revetment [J]. **Yellow River**，2013，**35**(7)：9-11，14. (in Chinese)

[12] 王普庆. 透水桩坝工程导流落淤效果和机理试验研究 [D]. 西安：西安理工大学，2003.
WANG Puqing. Experimental study on dredging effect and mechanism of diversion by water dike [D]. Xi′an：Xi′an University of Technology，2003. (in Chinese)

[13] 王燕燕，刘焕芳，王　振. 铅丝笼丁坝设计参数的变化对垂线平均流速的影响 [J]. 中国农村水利水电，2014(7)：136-138，142.
WANG Yanyan，LIU Huanfang，WANG Zhen. The influence about the changes of gabion groin design parameter to the longitudinal vertical velocity distribution [J]. **China Rural Water and Hydropower**，2014(7)：136-138，142. (in Chinese)

Study of effects of spur-dike group on river-regime control in lower reaches of the Yellow River

PENG Xiuzhu[1]，XU Xiangzhou[*1]，ZHAO Ying[2]，GAO Lu[1]

(1. School of Hydraulic Engineering，Dalian University of Technology，Dalian 116024，China；
2. Water Resources Research Institute of Shandong Province，Jinan 250013，China)

Abstract：To control the river-regime in the wandering channels in the lower reaches is important for the ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. The 2-D hydrodynamic numerical model for natural channel in the lower reaches of the Yellow River is constructed using MIKE21 software，and the control effects of the spur-dike group on the river-regime at various oriented angles，rows and structures are analyzed by control variable method. The results show that the capacities of the permeable spur-dike group and solid spur-dike group are approximately same to slowdown the flow and deposit the soil in the bent segment of the lower reaches of the Yellow River. The concentration of the suspended sediment behind the solid spur-dikes decreases from about 30 kg/m^3 to the lowest 24.72 kg/m^3，while that behind the permeable spur-dikes decreases to 24.08 kg/m^3. Both types of spur-dikes strongly protect the bank for the dikes may decrease the flow velocities by more than 80%. Besides flood control，the permeable spur-dikes，in which aquatic organisms are easily to live and reproduce because of its porousness，also have worthy ecological benefits. Nevertheless，the risk of dam break still exists in the engineering application due to lack of supporting theory and technical standard to construct the permeable spur-dikes. Hence，innovative design methods and new engineering materials are anticipated to improve the safety and practicability of control work.

Key words：wandering channel；spur-dike group；river-regime control；suspended-sediment concentration；numerical model