

南水北调中线一期穿黄工程对 河段水环境影响分析

王敏 郭涛 王楠 郜学军

(环境与移民工程院)

[摘要] 基于 EFDC 模型,构建水动力水质模型,对南水北调中线穿黄工程建设前后黄河干流河道束窄河段的流场、流速和水质进行模拟。结果表明,穿黄工程建设后黄河干流束窄河段流速增大,较天然状况下最大增大 0.6 m/s;束窄河段水体滞留时间变短,水体交换能力变强。束窄河段水动力条件的变化致使水质相应发生变化。在来水水质一致情况下,水体 COD、NH₃N 浓度较穿黄工程建设前有所减少。

[关键词] 南水北调中线 穿黄工程 EFDC 模型 黄河干流 水环境

南水北调中线工程是特大型调水工程,主要任务是满足华北地区用水需求。穿黄工程是南水北调中线总干渠穿越黄河的关键性工程,主要任务是将中线调水从黄河南岸输送到黄河北岸。穿黄工程修建后,将 10 km 宽的河宽束窄至 3.5 km,河道束窄将对水动力水环境产生一定影响。

水动力研究是河流水环境研究的基础,本次采用 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)^[1-2]水环境数学模型,构建穿黄工程建设前后黄河干流的水动力模型,并在此基础上进行水质模拟。水环境模型的建立,可以直观的表述不同情景下束窄河段水环境变化原因。黄河干流束窄河段水环境的影响研究,有利于了解束窄河道对河流水体污染物降解能力,为水环境控制、改善、管理提供科学的依据和决策方案,促进黄河干流水环境改善,落实黄河流域生态环境保护和高质量发展。

1 EFDC 简介

EFDC 模型耦合了水动力模块、泥沙输运模块、污染物运移模块和水质预测模块等,可应用于河流、湖泊(库)、湿地、河口以及海域等地表水体的水环境模拟^[3-5]。模型采用 FORTRAN 语言编制,基础是水动力模块,采用有限差分法求解水深、压力等三个方向的速度。水动力受地形影响明显,为更好反应水域地形起伏,垂向方向采用 σ 坐标系。EFDC 水质模块计算水质变量的源和汇,包括 NH₃-N、COD、

BOD₅、藻类等 21 个水质因子的量。分为 6 个变量组,分别为藻类、有机碳、磷、氮、硅以及其他。

2 工程概况

南水北调中线一期穿黄工程(以下简称穿黄工程)自荥阳市王村化肥厂南的 A 点,与中线总干渠荥阳段相接,终点为温县南张羌乡马庄东的 S 点,与温博段工程连接,输水线路总长 19 km。穿黄工程南岸为邙山,北岸为黄河大堤。地理位置见图 1。

穿黄工程对黄河干流有束窄影响的工程主要是南岸控导工程、北岸防护堤工程等。南岸控导工程与穿黄工程轴线相交,全长 4000 m。北岸防护堤工程布置在北岸隧洞出口,防护堤上游段长 761.8 m,下游段长 560.8 m。

穿黄工程所处位置河床演变复杂属游荡性河段。河道断面多为复式断面,有滩槽之分。主槽糙率小、流速大,是排洪的主要通道,过流能力占全断面过流能力的 60%以上,最大 80%以上。滩地糙率大、流速低,过流能力小,但对洪水有很大的滞洪泥沙作用。

3 模型建立

3.1 模拟区域

小浪底水利枢纽工程运行后,黄河中下游平滩流量一般为 4000 m³/s。在此情况下,水流顺主河槽

作者简介:王敏(1983—),女,山东省郓城人,硕士,高级工程师,从事环境保护与影响评价工作。

而下,北岸护堤工程束窄对水流基本不存在影响,对主河槽的束窄主要为南岸控导工程。主河槽束窄会对水流流速、水体交换能力等产生影响,进而对河流

水质产生一定程度的影响。模拟范围横向包括主河槽、南岸控导工程区域、北岸部分内滩,纵向河长为6 km,见图2。

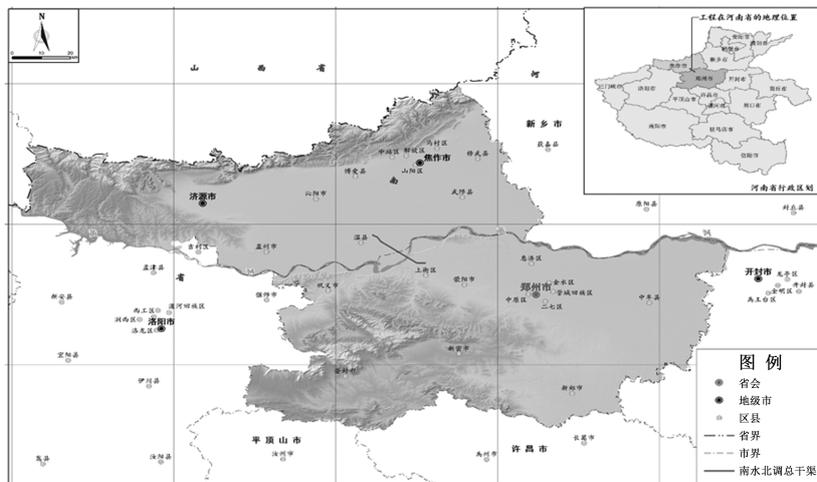


图1 穿黄工程地理位置



图2 模拟区域

3.2 计算网格

穿黄工程建设前后水动力水质模拟区域一致,采用 CVLGrid1.1 生成网格,网格文件导入 EFDC_

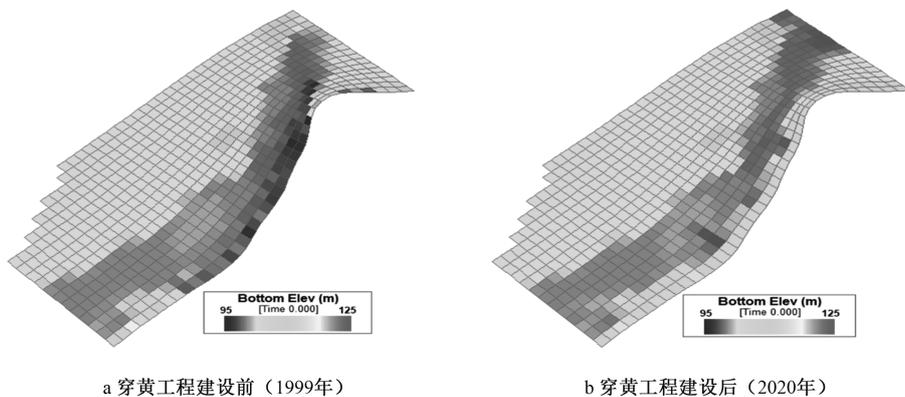
Explorer8.2 中。模拟区域河道横向概化为 17 个网格,平均宽度为 180 m;纵向划分为 40 个断面,平均宽度为 300 m,研究区域共有 644 个网格。

水下地形的获取难度较大,很多河流模型都缺乏河底地形数据,在建立模型时忽略了河底地形的起伏,均化为平底。本次利用穿黄工程建设前后的实测地形数据,充分考虑河底地形的起伏。穿黄工程建设前水下地形为 1999 年地形数据,穿黄工程建设后为 2020 年地形数据。穿黄工程模拟区域地形在 EFDC_Explorer8.2 中采用内插法进行赋值,模拟区域地形概化图如图 3。

3.3 边界条件

(1) 气象数据

气象边界条件为温度、湿度、太阳短波辐射、云量等,数据采用 1961~2010 年的月平均值,见表 1。数据来源为郑州气象站,位于郑州市南郊邱寨。



a 穿黄工程建设前 (1999年)

b 穿黄工程建设后 (2020年)

图3 模拟区域地形概化图

表 1 边界条件的月平均值

月份	气压/Pa	温度/℃	湿度/%	降雨/mm	蒸发/mm	太阳辐射 /W·m ⁻²	云量
1	921.2	-0.1	59	8.7	72.9	128.5	0.56
2	918.7	2	62	13.7	82.3	158.2	0.61
3	915.8	7.9	61	25.3	144	203.4	0.63
4	912.7	15.1	61	48.4	199	230.2	0.63
5	910.4	21.1	61	52.4	263.8	220.5	0.73
6	907	25.9	59	61.2	313	225.4	0.63
7	905.9	27.1	77	147	222	245.1	0.72
8	909.2	25.8	80	117	184	265.3	0.65
9	914.7	20.7	75	89.9	149	240.5	0.74
10	919.1	15	71	46.7	131.6	160.2	0.73
11	921	7.9	66	25.5	98.7	147.7	0.72
12	922.1	1.8	60	9.2	80.8	120.8	0.55

(2) 流量及水质边界

水动力模型的边界条件为上游流量边界和下游水位边界。上游流量边界为黄河现状平滩流量为 4000 m³/s。其中,糙率 n 及水质降解系数率定上边界流量为实测流量为 1000 m³/s。上游水质边界均为实测数据, NH₃N 浓度为 0.17 mg/L, COD 浓度为 17.6 mg/L。

3.4 参数设置

模型时间步长为 4 s, 初始温度设为 20 ℃ 的均温场, 采用冷启动。时间区间为 2019 年 1 月 1 日到 2019 年 12 月 31 日。

(1) 穿黄工程建设前参数确定

穿黄工程建设前的地形资料采用 1999 年实测数据, 由于工程建设前的流量、水深等数据难以获取, 无法率定糙率。根据黄河勘测规划设计研究院有限公司完成的黄河中下游大洪水演进推算研究以及余明辉等^[6]在穿黄隧洞束窄河道对河段水沙特性的影响分析中率定的糙率, 确定穿黄工程建设前水动力水质参数的糙率 n 为 0.013。

根据李国权^[7]研究可知 COD 及 NH₃N 的降解系数与流速、温度、溶解氧以及 pH 有关, 其中流速对污染物降解的影响最大, 为污染物降解中主要的影响因子。同时参照陈沛云^[8]、张世坤^[9]、胡国华^[10]等黄河中下游相关研究, 综合确定穿黄工程建

设前 COD、NH₃N 降解系数为 0.20、0.29。

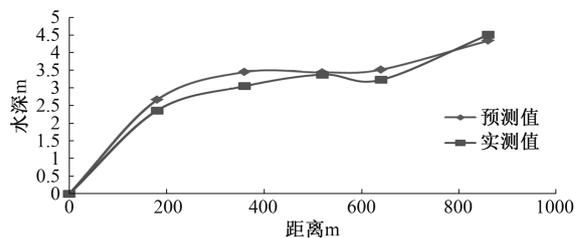
(2) 穿黄工程建设后参数确定

① 糙率 (n)

水动力模型中糙率 n 初设定为 0.01, 采用 2020 年 4 月实测数据的水深与预测水深进行对比, 对比结果见图 4 所示, 模拟水深和实测水深的最大水深差值为 0.4 m, 相对误差为 11.5%, 相对误差较小, 模拟结果可信, 确定糙率为 0.01。

② 水质参数

参数率定采用区域内三个断面实测水质数据进行。通过实测数据与模拟数据对比分析从而调整模型中的部分关键参数, 使模拟值与实测值贴近。通过对 NH₃N、COD 模拟值和实测值的相对误差分析, NH₃N、COD 的模拟值平均相对误差分别为 11.99%、12.60%, 见表 2。由表 2 可知模拟值和实测值相对误差较小, 模拟结果可行, 从而确定水质参数。水动力及水质参数确定结果见表 3。

图 4 大断面水深验证糙率 (n)表 2 COD、NH₃N 浓度相对误差分析

水质因子		1#穿黄断面上游	2#穿黄断面	3#穿黄断面下游
COD mg/L	实测值	17.66	15.33	14
	预测值	17.58	17.41	17.2
	相对误差%	0.45	13.57	22.86
NH ₃ N mg/L	实测值	0.167	0.138	0.134
	预测值	0.166	0.163	0.159
	相对误差%	-0.60	18.12	18.66

表3 各参数取值

参数	穿黄工程建设前	穿黄工程建设后
水动力参数		
n	0.013	0.01
KCD	0.20	0.25
降解系数		
KHNit DO	0.29	0.39
TN _{it}	20 ℃	

4 结果及分析

4.1 水动力分析

(1) 流场变化分析

穿黄工程建设前后模拟流场与河段内水流方向一致。

未建设穿黄工程的情况下,现行平滩流量下(4000 m³/s),水流不漫滩,基本在主槽中行进。全河段流速为0~2.1 m/s,水体流动性较好。流速由上游至下游逐渐增加,其中上游河段流速为0.8 m/s,穿黄段流速0.81 m/s,孤柏嘴下游河段流速为1.5 m/s。

穿黄工程建设后,平滩4000 m³/s时,由于自然情况下水流本身就顺河槽而下,北岸隧洞出口建筑物沿黄河的上、下游设置的防护堤不会影响到主河槽。南岸控导工程对主河槽束窄100~200 m。主河槽束窄后,全河段流速为0~3.2 m/s,水体流动性较好。流速由上游至下游逐渐增加,其中上游河段流速为0.8 m/s,穿黄段流速1.3 m/s,孤柏嘴下游河段流速为2.1 m/s。穿黄工程建设后,穿黄工程断面流速增大0.49 m/s,孤柏嘴断面增大0.6 m/s。见表4。

表4 穿黄工程建设前后研究区域内流速变化状况

流速(m/s)	1#穿黄断面 上游	2#穿黄 断面	3#穿黄断面 下游
穿黄工程建设前	0.8	0.81	1.5
穿黄工程建设后	0.8	1.3	2.1
相对差值	0	0.49	0.6

(2) 水体滞留时间变化分析

未建设穿黄工程的情况下,全河段水体滞留时间为0.2~0.3 d之间,水体滞留时间由上游到下游逐渐增加。穿黄工程后,全河段水体滞留时间为0.16~0.23 d之间,水体滞留时间由上游到下游逐渐增加。黄河干流束窄后水体停留时间变短,水体交换能力变强。见表5。

4.2 水质分析

黄河干流河段现状水质较好,满足地表水Ⅲ类水域水质要求。

(1) COD变化分析

由结果可知,未建设穿黄工程的情况下,COD浓度范围为17.25~17.59 mg/L。上游COD浓度

17.59 mg/L下游为17.25 mg/L,浓度值变化不大。

表5 穿黄工程建设前后研究区域内水体滞留时间变化状况

滞留时间(d)	1#穿黄 断面上游	2#穿黄 断面	3#穿黄断面 下游
穿黄工程建设前	0.2	0.25	0.29
穿黄工程建设后	0.16	0.19	0.23
相对差值	0.04	0.06	0.06

穿黄工程建设后,河段COD浓度范围为17.20~17.58 mg/L。上游COD浓度17.58 mg/L下游为17.20 mg/L,浓度值变化不大。见表6。

工程建设后,河段流速增加,水体交换能力变强。在来水水质一致情况下,下游河段水体COD浓度较工程建设前有所减少,幅度为0.3%。工程建设对水体COD浓度影响较小。

表6 穿黄工程建设前后研究区域内COD浓度变化状况

COD浓度(mg/L)	1#穿黄 断面上游	2#穿黄 断面	3#穿黄断面 下游
穿黄工程建设前	17.59	17.42	17.25
穿黄工程建设后	17.58	17.41	17.20
相对差值	-0.01	-0.01	-0.05

(2) NH₃N变化分析

由结果可知,未建设穿黄工程的情况下,NH₃N浓度范围为0.162~0.166 mg/L。NH₃N的浓度由上游的0.166 mg/L下降至下游的0.162 mg/L,浓度值变化不大。穿黄工程建设后,河段NH₃N浓度范围为0.159~0.166 mg/L。上游NH₃N浓度为0.166 mg/L,下游浓度为0.159 mg/L,浓度值变化不大。见表7。

穿黄工程建设后,由于河段流速增加,水体交换能力变强。在来水水质一致情况下,穿黄断面下游河段水体NH₃N浓度较工程建设前有所减少,减少幅度为1.9%。河段水质满足Ⅲ类水质要求。工程建设对水体NH₃N浓度影响较小。

表7 穿黄工程建设前后研究区域内氨氮浓度变化状况

NH ₃ N浓度(mg/L)	1#穿黄 断面上游	2#穿黄 断面	3#穿黄断面 下游
穿黄工程建设前	0.166	0.164	0.162
穿黄工程建设后	0.166	0.163	0.159
相对差值	0	-0.001	-0.003

5 结论

(1)应用EFDC建立的水动力模型,水深模拟值与实测值相对误差最大为11.5%,模拟结果可信。

(2)在水动力模型的基础上,构建水质模型,对COD、NH₃-N降解系数进行率定,误差分析结果良好。

(下转第13页)

(3)校核地震工况下,坝顶震陷率为0.21%,表明从变形安全考虑,坝体具有足够的安全储备。类比紫坪铺面板坝在汶川地震中的震害现象,认为阿尔塔什面板坝的工程设计能够满足“设计地震下,局部损伤可修复”的要求。

参考文献

- [1] 邓铭江,吴六一,汪洋,等.阿尔塔什水利枢纽坝基深厚覆盖层防渗及坝体结构设计[J].水利与建筑工程学报,2014(2):149-155.
- [2] 汪洋,曲苓.阿尔塔什水利枢纽混凝土面板砂砾石堆石坝设计及其主要工程特点[J].水利水电技术,2018,49(S1):4-9.
- [3] 范金勇.阿尔塔什深厚覆盖层上高面板砂砾石堆石坝坝体变形控制设计[J].水利水电技术,2016,47(3):29-32.
- [4] GB 51247-2018,水工建筑物抗震设计标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [5] 邢建营,关志诚,吕小龙.面板堆石坝深覆盖层处理技术研究及在河口村水库工程中的应用[J].岩土工程学报,2020,42(7):1368-1376.
- [6] 吕小龙,迟世春,贾宇峰.堆石料动力变形特性试验研究.岩土工程学报,2018,40(9):1729-1735.
- [7] 吕小龙,迟世春.基于变形控制标准的高土石坝地震可靠度分析.岩土工程学报,2019,41(3):519-525.
- [8] 顾淦臣,沈长松,岑威钧.土石坝地震工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [9] 沈珠江,徐刚.堆石坝的动力变形特性[J].水利水电

科学研究,1996,6(2):143-150.

- [10] 邹德高,孟凡伟,孔宪京,等.堆石料残余变形特性研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):807-812.
- [11] 迟世春,林皋.堆石料残余体应变对计算面板堆石坝永久变形的影响[J].水力发电学报,1998(1):59-67.
- [12] 沈婷,李国英.超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影响因素分析[J].岩土工程学报,2010,28(9):1345-1349.
- [13] 赵剑明,汪闻韶,常亚屏,等.高面板坝三维真非线性地震反应分析方法及模型试验验证[J].水利学报,2003,9:12-18.
- [14] 陈生水,李国英,傅中志.高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2013,35(1):59-65.
- [15] 陈生水,霍家平,章为民.“5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J].岩土工程学报,2008,30(6):795-801.
- [16] 宋胜武,蔡德文.汶川大地震紫坪铺混凝土面板堆石坝震害现象与变形监测分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):840-849.
- [17] 赵剑明,刘小生,温彦锋,等.紫坪铺大坝汶川地震震害分析及高土石坝抗震减灾研究设想[J].水力发电,2009,35(5):11-14.
- [18] 孔宪京,邹德高,周扬,等.汶川地震中紫坪铺混凝土面板堆石坝震害分析[J].大连理工大学学报,2009,

(上接第4页)

(3)穿黄工程束窄河道河段模拟流场与河段内水流方向基本一致,河段较窄区域水流速度急剧增大,整个河段总体流向平稳,基本无涡旋、环流。

工程建设后,束窄河段流速变化趋势与自然状况下一致,但流速增大。穿黄工程断面较自然状况流速增大0.49 m/s,孤柏嘴断面增大0.6 m/s。

束窄后水体停留时间变短,水体交换能力变强。河段水体停留时间变化趋势与自然状况一致,水体停留时间由上游到下游逐渐增加。

(4)由结果可知,工程建设前后黄河干流河段水质均满足III类水质要求。水质受来水水质影响较大。

工程建设后,由于评价河段流速增加,水体交换能力变强。在来水水质一致情况下,水体COD、NH₃N浓度较工程建设前均有所减少,减少幅度分别为0.3%、1.9%。工程建设对水体COD、NH₃N浓度影响较小。

参考文献

- [1] 樊乔铭,丁志斌.EFDC模型在港湾水环境中的应用及进展[J].人民珠江,2016,37(2):92-96.

- [2] Kyeong Park, Hoon-Shin Jung, Hong-Sun Kim. Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D) [J]. Marine Environmental Research, 2005, 60, 171-193.
- [3] 范一鸣.基于EFDC模拟的污水泄露事件对松花江哈尔滨段水质影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017.
- [4] 张文时.基于EFDC模型的山地河流动力水质模拟——以重庆市赵家溪为例[D].重庆:重庆大学,2014.
- [5] 马方凯,江春波,李凯.三峡水库近坝区三维流场及温度场的数值模拟[J].水利水电科技进展,2007,27(3):17-20.
- [6] 余明辉,范北林,余蔚卿.穿黄隧洞束窄河道对河段水沙特性的影响分析[J].水科学进展,2003,14(5):583-587.
- [7] 李国权.三峡库区排污口下游污染物降解规律的研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [8] 陈沛云.《黄河干流河南段水环境容量与水污染防治对策研究》[D].开封:河南大学,2005.
- [9] 张世坤,张建军,田依林等.黄河花园口典型污染物自净降解规律研究[J].人民黄河,2006,28(4):46-47.
- [10] 胡国华,赵沛伦.黄河孟津-花园口河段水环境容量研究[J].水资源保护,2002,1:26-28.