

吴永妍, 李书友, 郭辉, 等. 南水北调中线沉藻池布置方案优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 798-809. WU Y Y, LI S Y, GUO H, et al. Optimization of layout plan for the sedimentation tank of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 798-809. (in Chinese)

南水北调中线沉藻池布置方案优化

吴永妍¹, 李书友², 郭辉³, 刘少华¹, 黄明海³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 2. 南水北调中线实业发展有限公司, 北京 100038;
3. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

摘要:南水北调中线总干渠联通工程处拟新建沉藻池, 实现总干渠藻类等混合物集中沉降和处理。通过现场试验研究总干渠水体藻类等混合物沉降特性, 并采用二维水动力数值仿真分析沉藻池在设计工况条件下的水流特性, 提出导流墩的优化布置思路。结果表明: 在水深基本一致条件下, 随着断面平均流速的增加, 有效沉降距离增加, 有效沉降率有所降低; 在沉藻池初始设计方案下, 藻类等混合物可在沉藻池内进行沉降, 但沉藻池利用效率不足; 布置纵向导流墩后, 可有效改善沉藻池内水流平顺性和水体交换能力; 在设计工况下, 沉藻池内回流区水域面积占比从57%降低至7%, 池内水流平均流速从约0.10 m/s降低至约0.07 m/s, 平均水龄从约18 h降低至约6 h。研究成果可为中线沉藻池工程布置提供基本技术支撑。

关键词:南水北调中线; 沉藻池; 工程布置; 导流墩; 沉降距离

中图分类号: TV135.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0080

南水北调中线工程是国家水网的主骨架和大动脉^[1], 沿线用户对南水北调水的依赖程度增加, 对中线供水安全和水质安全保障要求进一步提高^[2-4]。中线工程主要从丹江口水库中下层引水, 渠首水头相对较低, 藻类含量不高。但总干渠输水线路长, 沿线大部分渠段为明渠, 输水流速较缓、光照条件好, 藻类能在特定条件下快速生长^[5-8]。当生长到一定规模或进入凋零期, 在一定水流冲刷作用下, 着生藻类脱落并分解为有机碎屑微粒, 与水中悬浮的泥沙微粒黏结成团, 形成颗粒状藻类残体^[9]。这些藻类残体混合物随水流运动, 易在退水闸和分水口附近静水区、泵站前池等部位淤积^[10-11]。目前, 规划在中线总干渠联通工程处新建沉藻池, 把南水北调中线总干渠输水流经沉藻池, 通过降低水流流速、改变水流特性, 实现总干渠藻类等混合物集中沉降和处理, 缓解总干渠藻类等混合物淤积问题, 保障中线工程的供水水质安全。

在沉藻池的工程设计方面, 尚无行业设计规范。为保证工程能发挥预期作用, 需研究藻类等混合物的沉降规律, 分析藻类等混合物沉降所需的平面距

离, 为工程布置提供关键设计参数。目前, 已有研究^[12-15]多针对浮游藻类的生长特性和输移运动规律。调查研究表明: 南水北调中线总干渠中的浮游植物群落具有显著的时空异质性^[16]; 影响藻类生长与种群组成的因素是多方面的, 包括营养盐等水质指标, 水深和流速等水动力指标及水温、光照、溶解氧和pH等其他的物理化学指标, 其中, 流速和流量等水动力条件对中线总干渠中的藻类群落变化起关键作用^[17]。然而, 藻类残体等混合物的沉降规律区别于浮游藻类沉降规律, 混合物沉降特性、在水动力条件驱动下平面运动规律有待进一步揭示。

首先通过现场试验, 研究南水北调中线总干渠中藻类等混合物的动水沉降特性, 分析混合物沉降所需的平面长度; 然后通过二维水动力模型和水龄模型, 研究沉藻池内藻类等混合物分布规律, 分析工程初步布置方案和优化布置方案的沉降效果, 为中线沉藻池工程设计提供技术支撑。

1 研究区概况

南水北调中线总干渠末端规划建设的沉藻池通

收稿日期: 2023-12-01 修回日期: 2024-06-17 网络出版时间: 2024-07-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240711.1013.016>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200202); 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主研发项目(CX2019Z01)

作者简介: 吴永妍(1990—), 女, 湖北武汉人, 高级工程师, 博士, 主要从事输水调度研究。E-mail: 1031880619@qq.com

过进、出口闸与总干渠连通,见图1。受限于工程布置条件等因素,沉藻池总体呈椭圆形,总干渠出口至池中断面逐渐变大,大约至池中部达到最大宽度,然后逐渐缩小经出口收缩渐变段与出口闸进口相接。主流道长约1200 m,平均宽度约400 m,中部最大宽度约500 m,两端与进出口闸连接处宽度约120 m。工程设计流量为 $125 \text{ m}^3/\text{s}$,进、出口闸均采

用3孔布置。沉藻池的底高程55.000 m,设计流量下水位为65.363 m,设计水深10 m。为充分利用沉藻池最大断面宽度,工程初始设计方案中,沿沉藻池横向交错布置了5条导流墩,引导水流转向沉藻池最大断面。导流墩长约100 m,宽度1 m,高度12.4 m,间距约60 m。

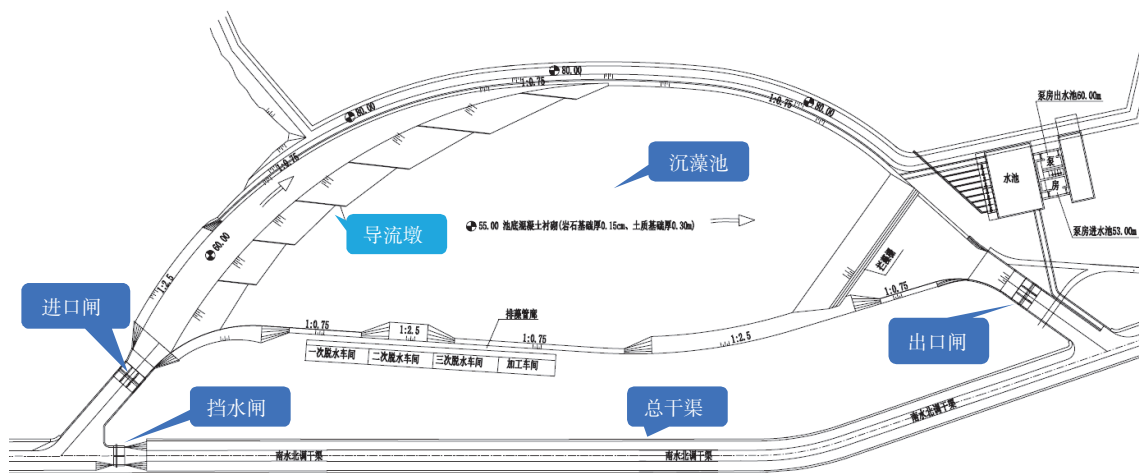


图1 沉藻沉沙池的工程布置

Fig. 1 Engineering location of the sedimentation tank

2 研究方法

首先,开展藻类等混合物现场沉降试验,测试分析混合物在不同低流速条件下的动水沉降规律,得出藻类等混合物的有效沉降距离,分析沉藻池平面布置尺寸的有效性。然后,采用数值仿真分析沉藻池内水流条件的平面分布特性和水体交换能力,分析沉藻池的利用效率,研究沉藻池方案的总体合理性。

2.1 现场试验方法

选取南水北调中线总干渠滹沱河退水闸下游退水渠作为现场试验场所。通过滹沱河退水闸将总干渠水体引入退水渠,在退水渠内开展藻类等混合物动水沉降试验,试验用水最终由退水渠流入滹沱河。滹沱河退水闸下游的退水渠渠底宽20 m,边坡1:3,渠道长约51.4 km,渠底坡度1:20 000。试验通过退水闸控制入渠流量,在退水渠尾部设置临时溢流堰,控制渠内水深和流速,以模拟沉藻池内的水流条件。

现场观测范围及监测断面布设见图2。其中,总干渠退水闸出口监测断面表征来水特性,50 m、100 m、200 m和300 m监测断面表征悬浮物沿程沉降特性,1 000 m监测断面表征退水渠尾部出流特性。实际监测过程中根据需要增加250 m和350 m

监测断面。每个监测断面在横断面中部布设一个监测垂线,在水面以下0.50 m、中间水深和渠底0.50 m以上分别设置3个监测点。

项目组前期模型试验表明,当水流水平流速达到 0.15 m/s 时,藻类等混合物沿程沉降率较低。结合现场调度实际条件等因素,现场试验设置4组工况,不同工况下水流流速 $0.03\sim 0.10 \text{ m/s}$,见表1。每组实验工况监测时长初步设置为2 d,监测频次为间隔8 h。定时在各个监测断面取样观测,主要观测指标为浊度和悬浮物浓度。现场浊度采用便携式浊度仪(Hach 2100Q)测量,悬浮物质量浓度采用重量法(GB 11901—89)测量,流速采用流速仪(YSI flowtracker)测量,水温、pH、DO等参数采用便携式多参数水质仪(Hach HQ30D)测量。

试验开始前,大幅度开启滹沱河退水闸进行泄水,在较短时间内将退水渠中存积的水体替换为总干渠中的新水。随后,通过调整退水闸开度,实现退水渠中水体呈现低流速流动。试验选择在总干渠藻类等混合物质量浓度较高的时间段(5—6月)开展,避免总干渠原水中混合物质量浓度过低可能达不到试验效果的问题。



图 2 现场试验范围及监测断面布置

Fig. 2 Field tests sites and monitoring sections

表 1 现场试验工况

Tab. 1 Field test conditions

工况	退水闸泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	退水渠水深/m	退水渠断面平均流速/(m·s ⁻¹)	断面中部实测平均流速/(m·s ⁻¹)
工况一	1.50	2.37	0.023	0.029
工况二	3.00	2.46	0.045	0.054
工况三	7.00	2.68	0.095	0.109
工况四	2.00	1.84	0.043	0.058

2.2 数值计算方法

沉藻池属于宽浅形水体,采用沿水深积分的平面二维数学模型开展模拟分析,该模型已广泛应用于河湖库等水体流动和水体交换能力模拟^[18-21]。

2.2.1 数值模型与求解

水动力模型采用二维浅水方程构建,控制方程表达式为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} &= fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \\ \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} &= -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \\ \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间, s; x 、 y 为纵向、横向坐标; η 为水位, m; d 为静水深, m; h 为水深, m, $h=d+\eta$; u 、 v 为 x 、 y 方向沿水深平均的流速分量, m/s; f 为 Coriolis 参数, $f=2\Omega\sin\Phi$ (Ω 为地球旋转角速度, Φ 为纬度); g 为重力加速度, m/s²; p_a 为大气压力, Pa; ρ_0 为水体参考密

度, kg/m³; ρ 为水体密度, kg/m³; S 为点源排放流量, m³/s; u_s 、 v_s 为点源排入环境水体内的速度分量, m/s。 τ_{xx} 、 τ_{yy} 为 x 、 y 方向的表面风应力, Pa; τ_{bx} 、 τ_{by} 为 x 、 y 方向的底部应力, Pa; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为波浪辐射应力张量分量, Pa; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为侧向应力分量, Pa, 计算表达式为

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

式中: A 为紊动黏性系数, 采用 Smagorinsky 提出的亚网格尺度紊动黏性系数^[22]:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (7)$$

式中: c_s 为 Smagorinsky 系数, 一般取 0.28; l 为特征长度, 一般取水深; 应变率可表示为

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (8)$$

水龄是换水能力的一种时间尺度参量, 可以定量反映水体的交换能力和滞留状况, 广泛应用于湖泊、海洋以及河流的连通研究^[22-25]。水龄指边界水体完全交换至各水体单元的时间。换水能力越强, 回流区越小, 水龄越短。水龄模型采用二维守恒示踪剂输运及年龄质量浓度方程构建, 其控制方程表达式为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u}c - K\nabla c) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u}\alpha - K\nabla \alpha) = 0 \quad (10)$$

$$a = \frac{\alpha}{c} \quad (11)$$

式中: c 为守恒性示踪物质质量浓度, mg/L ; α 为水龄质量浓度, $(\text{mg}\cdot\text{s})/\text{L}$; u 为流速场, m/s ; K 为扩散系数, m^2/s ; a 为水龄, s 。

应用有限体积法及黎曼近似解对控制方程进行数值求解。用非结构网格使计算区域离散化, 然后逐时段地用有限体积法对每一单元建立水量、动量平衡, 确保其守恒性。

2.2.2 模拟范围与网格划分

模拟范围包括沉藻池及其进出口, 采用三角形非结构网格划分模拟区域, 在沉藻池进出口、导流墩等区域加密网格。以初步布置方案为例, 最小网格面积约 0.68 m^2 , 共有网格节点 12 878 个, 网格单元 24 286 个。

为分析网格数量对模拟结果的影响, 将网格单元减少为 18 848 个, 网格节点减少为 10 123 个后重新计算。沿沉藻池主流纵向取 5 个分析点。结果表明, 不同网格条件下, 计算点流速值基本一致, 流速绝对误差在 0.02 m/s 以内, 相对误差在 8% 以内, 见表 2。因此, 所采用网格划分方案可应用于沉藻池模拟分析。

表 2 不同网格条件下的计算流速结果

Tab. 2 Flow velocity results under different grid conditions

计算点	模拟网格条件 流速值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	数量较少网格条件 流速值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	绝对误差/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	相对 误差/ $\%$
P_1	0.63	0.63	0	0
P_2	0.28	0.29	0.01	4
P_3	0.25	0.27	0.02	8
P_4	0.14	0.13	-0.01	-7
P_5	0.56	0.55	-0.01	-2

3 结果与分析

3.1 现场试验结果分析

参考沉沙池的水力设计方法^[26-27], 水体浊度和悬浮物质量浓度的沿程变化规律均可反映沉降特性。退水渠沿程不同距离监测断面沉降率 η_i 可表示为

$$\eta_i = \left(1 - \frac{c_i}{c_0}\right) \quad (12)$$

式中: c_i 为退水渠沿程各监测断面的水体悬浮物质量浓度, mg/L ; c_0 为退水渠出口水体悬浮物质量浓度, mg/L 。

沿程不同距离监测断面对应沉降 ω_i 可表示为

$$\omega_i = \frac{h}{L_i/u} \quad (13)$$

式中: h 为试验工况水深, m ; L_i 为各监测断面距退水闸的水平距离, m ; u 为试验工况水平流速, m/s 。

3.1.1 各工况水流沉降特性

从退水闸进口至水体沿程浊度变化不明显的拐点的水平距离可认为是观测法得到的有效沉降距离。有效沉降距离对应的断面的沉降率称为有效沉降率。各工况下的水流沉降特性参数见表 3。

表 3 现场试验的水流沉降特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of water flow settlement from field tests

工况	断面中部实测 平均流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	有效沉降 距离/ m	有效 沉降率/ $\%$	有效沉降率对应 动水沉速/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
工况一	0.029	89	69	0.79
工况二	0.054	239	63	0.56
工况三	0.109	389	55	0.76
工况四	0.058	139	64	0.75

工况一退水闸进水平均浊度 13.07 NTU , 平均质量浓度约 29.4 mg/L 。大部分明显可见悬浮颗粒在闸后消力池内沉降, 退水渠 50 m 监测断面后的水体浊度变化较小, 平均浊度约 4.42 NTU , 平均质量浓度约 9.1 mg/L 。有效沉降距离约 89 m 。

工况二退水闸进水平均浊度 12.05 NTU , 平均质量浓度约 29.2 mg/L 。退水渠 200 m 监测断面后的水体浊度变化较小, 平均浊度约 5.10 NTU , 平均质量浓度约 10.9 mg/L 。有效沉降距离约 239 m 。

工况三退水闸进水平均浊度 11.33 NTU , 平均质量浓度约 27.3 mg/L 。退水渠 350 m 监测断面后的水体浊度变化较小, 平均浊度约 5.63 NTU , 平均质量浓度约 12.3 mg/L 。有效沉降距离约 389 m 。

工况四退水闸进水平均浊度 8.34 NTU , 平均质量浓度约 19.4 mg/L 。退水渠 100 m 监测断面后的水体浊度变化较小, 平均浊度约 3.63 NTU , 平均质量浓度约 6.9 mg/L 。有效沉降距离约 139 m 。

试验结果表明, 在水深基本一致的条件下, 随着退水渠断面平均流速的增加, 有效沉降距离增加, 但有效沉降率有所降低。在断面平均流速基本一致条件下, 有效沉降率受水深影响不显著; 水深越大, 有效沉降距离越长。

3.1.2 不同沉降率对应的特征沉降速度

点绘工况二和工况三各个监测断面沉降率和沉降速度之间的关系, 见图 3。工况一中混合物沉降

距离较短, 试验数据点不足, 不列入分析范围。动水沉降速度与沉降率之间可用三参数指数衰减模

型表征, 通过拟合曲线推算出试验工况下不同沉降率对应的特征沉降速度, 见表 4。

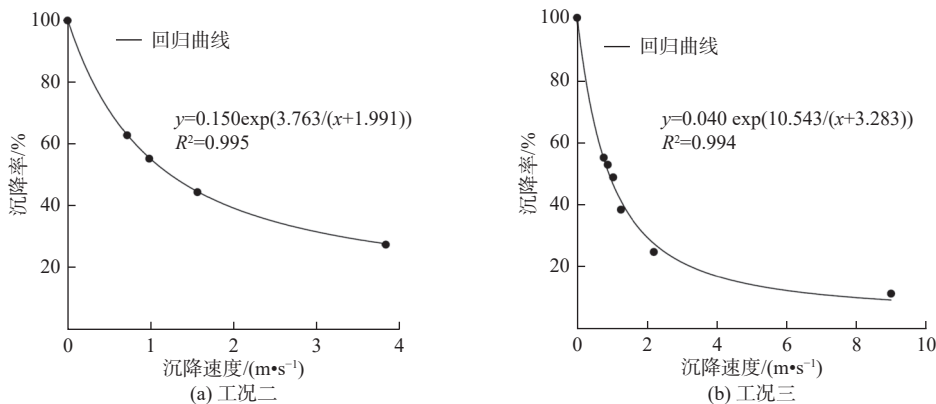


图 3 沉降率和沉降速度关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between sedimentation rate and sedimentation velocity

表 4 不同沉降率对应的特征沉降速度
Tab. 4 Characteristic settlement velocity corresponding to settlement efficiency 单位: mm/s

工况	沉降率/%							
	50	55	60	65	70	75	80	85
工况二 (水平流速 0.054 m/s)	1.13	0.91	0.72	0.58	0.45	0.35	0.26	0.18
工况三 (水平流速 0.109 m/s)	0.89	0.74	0.61	0.50	0.40	0.31	0.24	0.17

基于现场动水试验工况得到的沉降率与沉降速度的对应关系, 采用线性差值推算出水平流速为 0.025、0.050、0.075 和 0.100 m/s 这 4 种情景下不同沉降率对应的沉降速度, 见表 5。设计沉降率为 70% 时, 水平流速 0.025、0.050、0.075 和 0.100 m/s 对应特征动水沉降速度分别为 0.62、0.47、0.43 和 0.41 mm/s。

表 5 不同沉降率、不同水平流速对应的沉降速度
Tab. 5 Settlement velocities under different settlement efficiencies and horizontal flow velocity 单位: mm/s

沉降率/%	水平流速 / (m·s⁻¹)			
	0.025	0.050	0.075	0.100
50	2.64	1.34	1.04	0.93
55	1.86	1.04	0.84	0.77
60	1.26	0.80	0.68	0.63
65	0.87	0.62	0.55	0.51
70	0.62	0.47	0.43	0.41
75	0.44	0.36	0.33	0.32
80	0.30	0.26	0.25	0.24
85	0.19	0.18	0.17	0.17

相同沉降率条件下, 动水沉降速度随着来流水水平流速增加而减小, 表明来流水水平流速越大, 藻类等混合物的沉降难度越大。以需要达到沉降率 70% 为例, 现场试验条件下, 来流水水平流速 0.025 m/s 对应的动水沉降速度为 0.62 mm/s, 来流水水平流速 0.100 m/s 对应的动水沉降速度为 0.41 mm/s。

相同来流水水平流速条件下, 动水沉降速度随要求达到的沉降率增加而减小, 表明设计沉降率越高, 需要的水流流速越低, 才能沉降更多的藻类等混合物。

采用准静水法^[12], 计算不同水深和水平流速条件下对应的有效沉降距离 L , 计算公式为

$$L = K \frac{H}{\omega} V \quad (14)$$

式中: K 为修正系数, 本研究暂不考虑流速不均匀性, K 值取 1.0; ω 为藻类等混合物沉降速度, m/s; H 为工作水深, m; V 为水平流速, m/s。

不同水深和水平流速条件下, 藻类等混合物的有效沉降距离计算结果见表 6。有效沉降距离随水平流速和水深的增加而增大。根据工程设计方案, 沉藻池设计沉降速度取 0.50 mm/s, 水平流速取 0.050 m/s, 沉降率取 70%。设计工作条件下, 藻类等混合物的有效沉降距离为 1 064 m, 小于沉藻池的设计长度 1 200 m, 初步认为藻类等混合物可在沉藻池内进行沉降。

3.2 数值仿真结果分析

设计流量工况下, 沉藻池内流线、流速和水龄分布分别见图 4。沉藻池进水主流沿池体左侧流向出口, 主流宽度约 130 m, 约占最大过水断面宽度的 27%; 沉藻池平均流速约 0.100 m/s, 主流区流速大多位于 0.100 m/s 以上, 主流流速约 0.400~0.100 m/s;

水平流速大于 0.050 m/s 水域面积约 27.1 万 m², 约占总面积的 49%, 水平流速大于 0.100 m/s 水域面积约 18.6 万 m², 约占总面积的 34%; 池体右侧存在大片低流速回流区, 回流区水域面积约占总面积的 57%。沉藻池平均水龄约 18 h, 主流区水龄沿程逐渐增加, 出口水龄约为 8~14 h, 池体右侧低流速回流区局部水域水龄可达 51 h 以上。

表 6 不同水深和水平流速条件下的有效沉降距离
Tab. 6 Effective settlement distance under different water depth and horizontal flow velocity

水深 / m	水平流速 / (m·s ⁻¹)			
	0.025	0.050	0.075	0.100
4	161	426	698	976
6	242	638	1 047	1 463
8	323	851	1 395	1 951
10	403	1 064	1 744	2 439

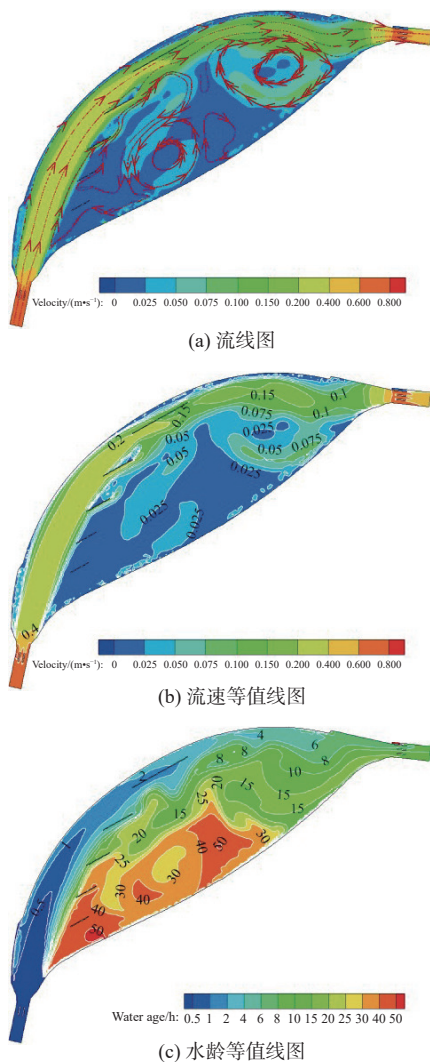


图 4 初步布置方案计算结果
Fig. 4 Calculation results of preliminary layout plan

3.3 工程优化布置方案分析

3.3.1 优化布置思路

沉藻池内水域一般应满足如下原则:

(1) 水流平顺, 评价指标为沉藻池水流平顺区宽度占最大过水面宽度的百分比;

(2) 水流流速值满足沉降需求, 评价指标为沉降区水平流速大于 0.050 m/s 水域面积占沉藻池面积百分比, 水平流速大于 0.100 m/s 水域面积占沉藻池面积百分比;

(3) 避免出现回流死水区, 评价指标为回流死水区水域面积占沉藻池面积百分比。

设计流量条件下, 沉藻池主流均偏向池体左侧, 池体右侧形成大片低流速回流区, 水体交换能力较弱, 沉藻池利用效率不足。多组探索性工况模拟表明, 局部调整初步布置中导流墩的布置很难获得较好水流条件。基于初步方案主流偏向池体左侧的流场特性, 结合工程原始设计情况, 保持导流墩形态基本不变, 通过导流墩长度和布置, 尽可能将进水水流均匀分布于沉藻池横断面。据此, 提出布置纵向或横向导流墩两种优化思路, 创造更平顺的水流条件。

3.3.2 纵向导流墩的优化方案

将导流墩在进口扩散区沿横断面均匀布置, 使进口水流尽可能均匀导向沉藻池。保持初步布置方案中导流墩的形态和高度不变, 调整纵向导流墩的长度、数量或位置, 设置 4 组纵向导流墩方案, 见图 5。

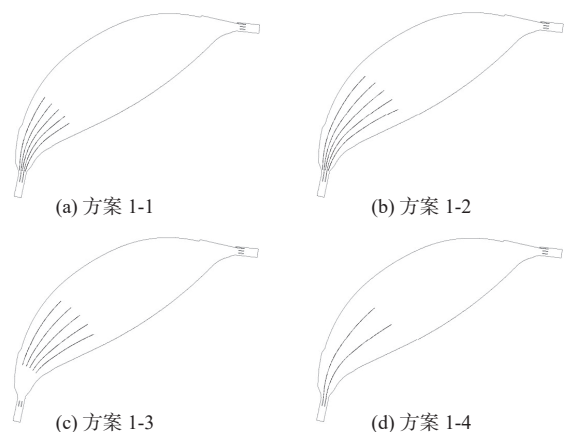


图 5 纵向导流墩优化布置方案
Fig. 5 Optimization layouts with longitudinal diversion piers

方案 1-1: 沿横断面布置 5 个导流墩, 单个导流墩长约 450 m, 宽 1 m。

方案 1-2: 在方案 1-1 基础上, 增加导流墩尾部长度, 单个导流墩长度增加至约 650 m, 宽 1 m。

方案 1-3: 在方案 1-1 基础上, 后移导流墩首部位置, 单个导流墩长度仍为 450 m, 宽 1 m。

方案 1-4: 沿横断面布置 2 个导流墩, 单个导流墩长度约 650 m, 宽 1 m。

模拟分析各优化布置方案在设计工况下的水流特性, 结果见表 7, 水流流线和流速分布见图 6、图 7。

方案 1-2 和方案 1-1 计算结果相比, 主流宽度占最大过水断面宽度百分比从 58% 增加到 83%, 回流区水域面积占总面积百分比从 21% 减小到 7%, 水平流速大于 0.05 m/s 水域面积占总面积百分比从 47% 减小到 42%, 水平流速大于 0.10 m/s 水域面积占总面积百分比基本相同, 表明增加导流墩尾部长度, 使水流均匀扩散至沉藻池最大横断面处, 可显著改善池内水流条件。

同样地, 方案 1-3 和方案 1-1 计算结果表明, 若导流墩首部位置后移, 进口主流将偏向沉藻池右侧, 在池体右侧形成大面积低流速回流区。方案 1-4 和方案 1-2 计算结果表明, 若导流墩数量减少, 水流不

能在沉藻池横向均匀分配。

多方案模拟结果表明, 纵向导流墩优化布置思路中, 方案 1-2 布置下沉藻池水流条件较好。

表 7 不同纵向导流墩方案的水流特性

Tab. 7 Flow characteristics under different scheme of longitudinal diversion piers

水流特性指标	方案 1-1	方案 1-2	方案 1-3	方案 1-4
主流宽度/m	280	400	120	180
主流宽度占最大过水断面宽度百分比/%	58	83	25	38
平均流速/(m·s ⁻¹)	0.07	0.07	0.08	0.09
水平流速大于 0.05 m/s 水域面积/万 m ²	25.8	23.1	22.4	31.9
水平流速大于 0.10 m/s 水域面积/万 m ²	8.3	8.8	13.5	13.4
水平流速大于 0.05 m/s 水域面积占总面积百分比/%	47	42	41	58
水平流速大于 0.10 m/s 水域面积占总面积百分比/%	15	16	24	24
回流区水域面积占总面积百分比/%	21	7	62	48

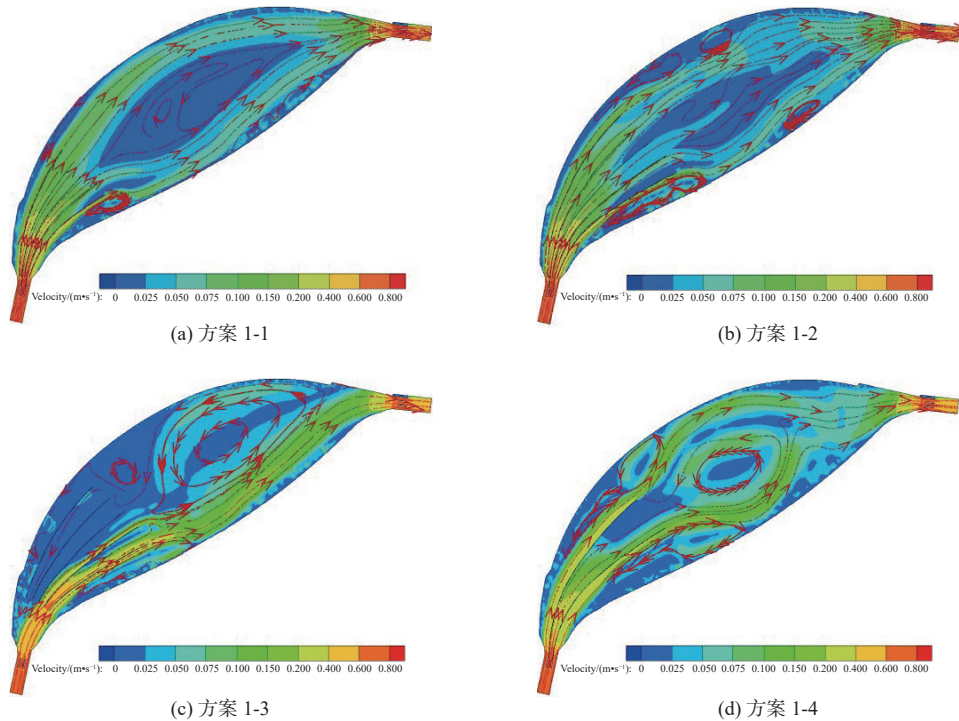


图 6 纵向导流墩各方案流线图

Fig. 6 Streamline under different schemes of longitudinal diversion piers

3.3.3 横向导流墩的优化方案

沿沉藻池进口扩散区均匀设置多排分流墩, 使进口水流在池内横断面充分扩散。单个分流墩长 8 m, 宽 2 m, 高仍为 12.4 m, 通过调整分流墩间距和排数,

设置 4 组不同横向导流墩方案, 见图 8。

方案 2-1: 布置 6 排分流墩, 分流墩间距 6 m, 每排分流墩数量分别为 9、12、16、24、34 和 43 个。

方案 2-2: 布置 6 排分流墩, 分流墩间距 12 m,

每排分流墩数量分别为 5、6、8、12、17 和 22 个。

方案 2-3: 布置 5 排分流墩,其他布置参数同方

案 2-1。

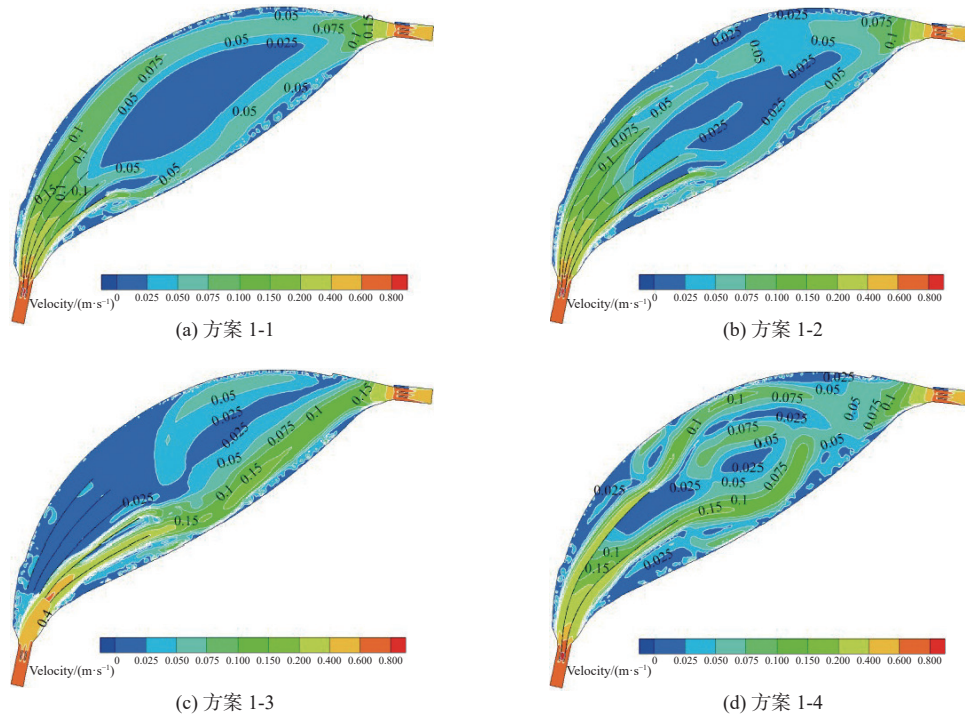


图 7 纵向导流墩各方案流速分布等值线

Fig. 7 Contour maps of flow velocity distribution under different schemes of longitudinal diversion piers

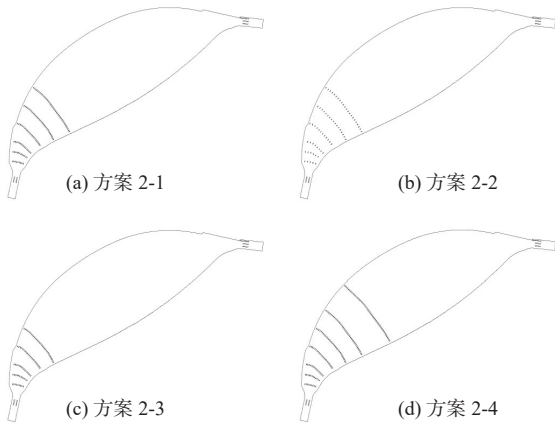


图 8 横向导流墩优化布置方案

Fig. 8 Optimization layout with transverse diversion piers

方案 2-4: 布置 7 排分流墩,其他布置参数同方案 2-1,第 7 排增加分流墩 54 个。

不同横向导流墩布置方案的水流特性计算结果见表 8,水流流线和流速分布见图 9 和图 10。多方案模拟结果表明,减小分流墩间距,水流在沉藻池横向的分散效果明显降低;横向导流墩排数增加,水流在沉藻池横向的分散效果提高。横向导流墩优化布置思路中,方案 2-4 布置下沉藻池水流条件较好。

将纵向、横向导流墩代表方案的水龄计算结果

和初步布置方案比较,分析沉藻池的水体交换特性,见表 9 和图 11。平均水龄从约 18 h 降低至约 6 h,池内回流区局部最高水龄从约 51 h 降低至 20~22 h,沉藻池出口水龄受主流影响变化不大。因此,导流墩优化方案的水体交换能力比初步布置方案有较大提升,且纵向导流墩布置方案 1-2 略优于横向导流墩布置方案 2-4。

表 8 不同横向导流墩布置方案的水流特性

Tab. 8 Flow characteristics under different scheme of transverse diversion piers

水流特性指标	方案 2-1	方案 2-2	方案 2-3	方案 2-4
主流宽度/m	350	200	320	380
主流宽度占最大过水断面宽度百分比/%	73	42	67	79
平均流速/(m·s ⁻¹)	0.07	0.07	0.07	0.07
水平流速大于 0.05 m/s 水域面积/万 m ²	18.4	27.7	24.7	16.3
水平流速大于 0.10 m/s 水域面积/万 m ²	6.9	8.4	7.0	7.0
水平流速大于 0.05 m/s 水域面积占总面积百分比/%	33	50	45	30
水平流速大于 0.10 m/s 水域面积占总面积百分比/%	13	15	13	13
回流区水域面积占总面积百分比/%	18	41	21	14

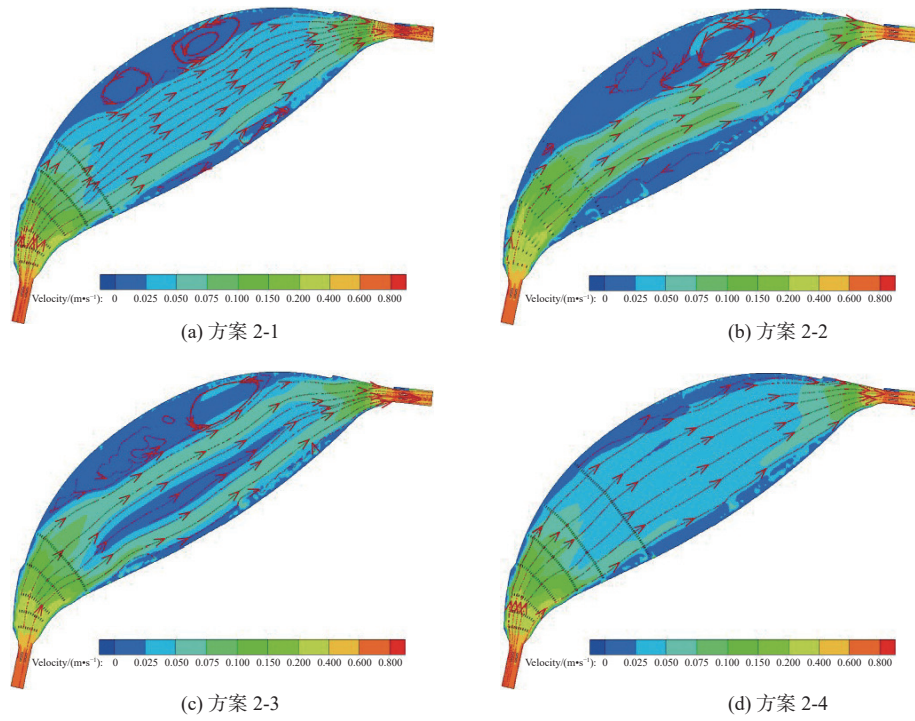


图 9 横向导流墩各方案流线图

Fig. 9 Streamlines under different scheme of transverse diversion piers

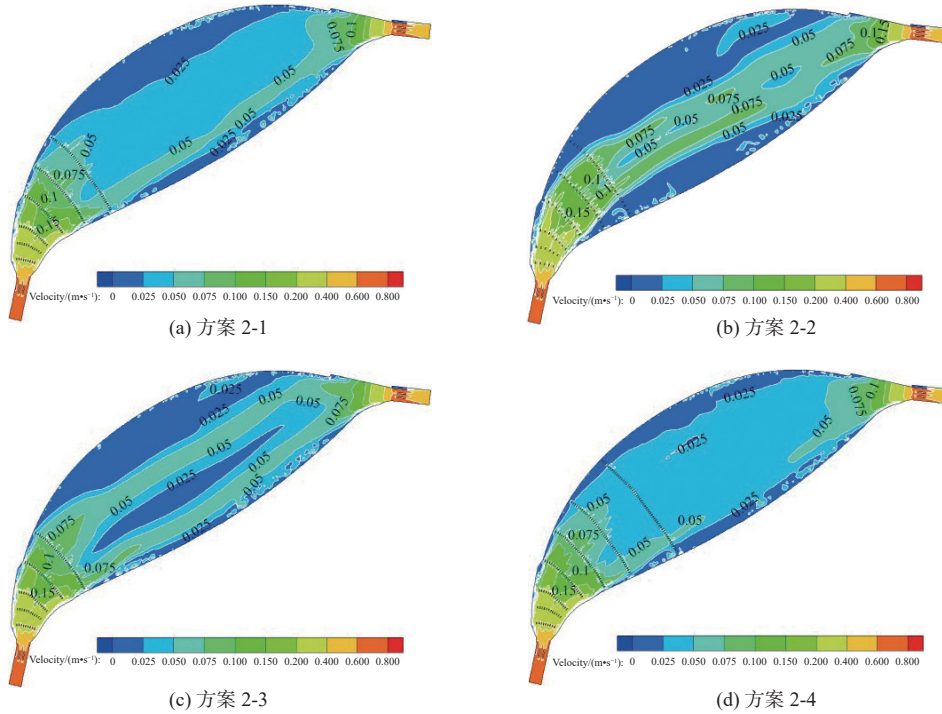


图 10 横向导流墩各方案流速分布等值线

Fig. 10 Contour maps of flow velocity distribution under different scheme of transverse diversion piers

从工程运维角度,纵向导流墩优化方案在池内布置的导流墩数量少,且布置较规则,更有利于采用大型机械化清淤处理。综合考虑,推荐沉藻池内纵向导流墩优化布置的思路。

4 结论

南水北调中线总干渠联通工程处拟新建沉藻池,

实现总干渠藻类等混合物集中沉降和处理。本文通过现场试验,研究了总干渠水体藻类等混合物沉降特性,初步分析了沉藻池长度尺寸的有效性,通过数值仿真研究了沉藻池在设计工况条件下的水流特性,提出了多种导流墩优化方案,计算分析了各个沉藻池方案下的水体流动特性,供后续深化设计参考。

表 9 不同代表布置方案的水体交换特性
Tab. 9 Water exchange characteristics under different representative layout plan 单位: h

水流特性指标	初步布置方案	方案1-2	方案2-4
平均水龄	18	6	6.0
沉藻池出口水龄	11	10	10.5
局部最高水龄	51	20	22.0

沉藻池设计工作条件下,藻类等混合物的有效沉降距离为 1 064 m,可在沉藻池内进行沉降。

沉藻池初始布置方案的利用效率不高。调整导流墩布置,可起到改善水流特性的作用。导流墩调

整布置方案分纵向导流墩方案和横向分流墩方案两类,纵向导流墩布置方案的水流条件更有利于藻类等混合物均匀沉降,且导流墩数量少、分布集中,更有利于清淤运行管理。

沉藻池优化布置后,水流流速阈值基本满足沉降需求,水流平顺性提升,回流区减小,水体交换能力大幅增强。设计工况条件下,沉藻池内平均流速从约 0.10 m/s 降低至约 0.07 m/s,主流宽度占最大过水断面宽度百分比从 27% 提高至 83%,回流区面积占比从 57% 降低至 7%,平均水龄从约 18 h 降低至约 6 h。

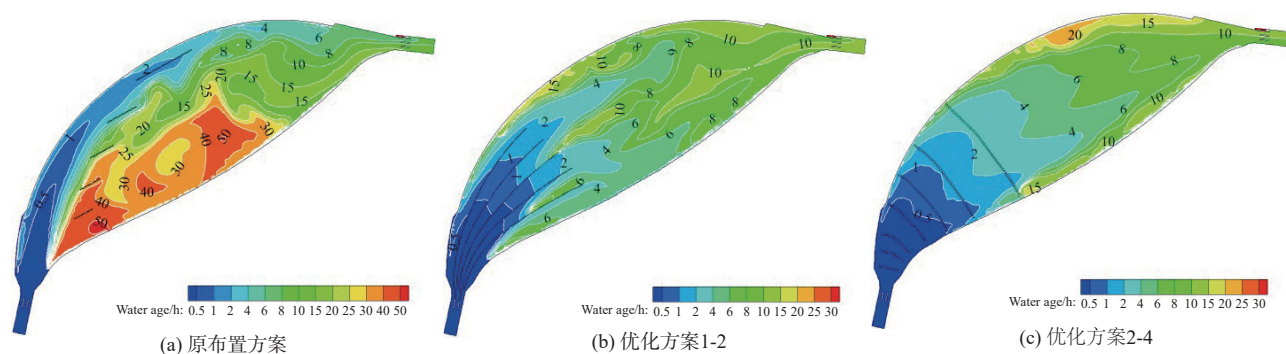


图 11 设计工况下的水龄分布等值图

Fig. 11 Contour maps of water age distribution under design conditions

通过二维数值模拟方法虽然能够直观分析沉藻池水流特性,但水流特性不是决定藻类等混合物沉积的唯一条件。因此,后续深入研究还应通过三维模拟仿真等手段,充分研究沉藻池的沉降效果和淤积特性,结合工程建设运行条件和难度,进一步完善沉藻池的方案设计。

参考文献:

- [1] 深入分析南水北调工程面临的新形势新任务 科学推进工程规划建设提高水资源集约节约利用水平 [N]. 人民日报, 2021-05-15(1). DOI: 10.28655/n.cnki.nrmrb.2021.005046.2021(6):4.
- [2] 吴险峰, 陈庆伟, 王冠, 等. 南水北调从科学研究到工程实践的几个关键问题 [J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1731-1743. DOI: 10.11821/dlxb202307013.
- [3] 张娜, 李波, 刘子慧, 等. 南水北调京津冀豫受水区水资源供需新形势及对策 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2023, 21(6): 1223-1234. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0121.
- [4] 陈晓楠, 靳燕国, 许新勇, 等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51(5): 46-55. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.007.
- [5] 张志浩, 杜兆林, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干渠藻类增殖潜势的数学分析方法与建议 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 123-128. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0092.
- [6] 崔巍, 刘哲, 穆祥鹏, 等. 南水北调中线总干渠藻类的生态调度 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(1): 79-86. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0009.
- [7] 楼春华, 钱松山, 杨思敏, 等. 南水北调中线北京段沿线沉积物特征及来源分析 [J]. 北京水务, 2023(6): 39-47. DOI: 10.19671/j.1673-4637.2023.06.008.
- [8] 南水北调中线干线工程渠首分局. 南水北调中线干线工程渠首分局水体藻类防控预案 (试行)[R]. 南水北调中线干线工程渠首分局, 2015.
- [9] 吴夺, 林俊强, 彭期冬, 等. 藻类残体颗粒的沉降特性与模型材料选择 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 85-90. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.011.
- [10] 付军, 程曦, 王亚琦, 等. 南水北调中线工程渠道及建筑物淤积情况研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(S1): 347-350. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.081.
- [11] 任海平, 段春建, 张铁财, 等. 南水北调中线总干渠悬浮物时空分布及其与浮游植物的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(11): 2473-2480. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202211012.

- [12] 陈筱诺. 南水北调中线干渠(河南段)着生藻群落结构变化及驱动因子研究[D]. 南阳: 南阳师范学院, 2022.
- [13] 胡豫英, 胡鹏, 朱杰, 等. 附着性藻类生长-迁移模型及其在南水北调中线工程中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(1): 61-68. DOI: 10.11705/j.
- [14] 杨梦薇, 管光华, 刘大志. 输水渠系着生藻类水力生消动态建模及仿真研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(1): 12-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.01.003.
- [15] 李波. 流速对南水北调中线干渠浮游植物群落演替与生长的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [16] 张春梅, 朱宇轩, 宋高飞, 等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 675-686. DOI: 10.18307/2021.0305.
- [17] 陈啸. 长距离输水渠道浮游藻类空间变化规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- [18] 杨卫, 张利平, 李宗礼, 等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 115-128. DOI: 10.11821/dlxb201801010.
- [19] 杨中华, 朱政涛, 槐文信, 等. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(2): 156-167. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170577.
- [20] 胡克龙, 计勇, 岑奕兴, 等. 基于 MIKE21 的信江八字嘴顺直分汊河道水动力特性及河床演变分析[J]. *人民珠江*, 2023, 44(6): 83-90. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2023.06.011.
- [21] 牛晓瑜, 吴梦迪, 林玲, 等. 引水改善星海湖的水动力-水质特性数值模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(5): 140-148. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2023.05.16.
- [22] 黄爱平, 刘晓波, 彭文启, 等. 鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析[J]. *水利学报*, 2021, 52(9): 1082-1090. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200807.
- [23] 王钟, 范中亚, 杨忠勇, 等. “引江济淮”工程对安徽菜子湖水龄分布的影响[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1576-1586. DOI: 10.18307/2018.0609.
- [24] 陈黎明, 陈炼钢, 李褪来, 等. 城市湿地公园生态补水调度方案对比分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 162-167. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2002.06.022.
- [25] 杨金艳, 徐勇, 周杰, 等. 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选[J]. *水利水电工程学报*, 2020(2): 85-90. DOI: 10.12170/20190226004.
- [26] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程沉沙池设计规范: SL/T 269—2019, [S]. 北京: 中国水利水电出版社.
- [27] 黎运芬, 杨晋营, 张金凯. 水利水电工程沉沙池设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

Optimization of layout plan for the sedimentation tank of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

WU Yongyan¹, LI Shuyou², GUO Hui³, LIU Shaohua¹, HUANG Minghai³

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Corporation, Wuhan 430010, China; 2. South-to-North Water Diversion Middle Route Industrial Development Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: South-to-North Water Transfers Project is a large-scale water diversion project to alleviate the severe shortage of water resources in northern China. Practical experience show that algae can grow rapidly under specific conditions along the main canal. The mixture of algae residues moves with water flow and is prone to siltation in the static water area near the discharge gate and diversion outlet, as well as in the front pool of the pumping station. Therefore, algae sedimentation tank was proposed to build near the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project to settle the algae and other mixtures in the main canal. Due to being short of universal standard for the design of sedimentation tanks, the required planar distance for settling algae and other mixtures need to be studied, so as to provide key design parameters for its engineering layout.

The method of on-site experiments was used to study the sedimentation characteristics of algae and other mixtures in the main canal of the Middle Route Project. In this way, the effectiveness of the length of the sedimentation tank could be estimated. Then, the method of numerical simulation was adopted to analyze the water flow characteristics in the sedimentation tank under design condition. The existing plan may not be effective in settlement efficiency. Thus, some improved schemes were proposed characterized by setting diversion piers, and their effects were explored by numerical simulation.

The results indicated that with the increase of the average flow velocity, the effective settlement distance

increases while the effective settlement rate decreases, when the water depth is basically the same. For the initial design scheme, the mainstream leans towards the left side of the tank, and there is a large area of low flow velocity reflux on the right side of the tank, which accounts for about 57% of the total area. When longitudinal diversion piers were arranged evenly along the cross-section in the inlet diffusion zone, the percentage of water area of the recirculation zone in the sedimentation tank was decreased from 57% to 7%, the average flow velocity in the tank was decreased from about 0.10 m/s to about 0.07 m/s, and the average water age was decreased from about 18 h to about 6 h under the design condition. When transverse diversion piers were arranged similarly, the percentage of water area of the recirculation zone in the sedimentation tank was decreased from 57% to 14%, while the decrease of average flow velocity in the tank and the average water age was almost the same as the plan of longitudinal diversion piers.

The conclusion indicates that the effective settling distance of algae and other mixtures is 1,064 m under the design working conditions of the sedimentation tank, which means that algae and other mixtures could settle within the sedimentation tank. However, the utilization efficiency of the initial layout plan of the sedimentation tank is relatively low. With the deployment of longitudinal diversion piers, the flow smoothness and the water exchange capacity in the sedimentation tank could be improved. Findings of this study could provide technical support for the overall layout design of the algae sedimentation tank. In the subsequent in-depth research, three-dimensional simulation and other means should be used to fully study the sedimentation characteristics of the tank to further improve the design.

Key words: the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; sedimentation tank; layout design; diversion pier; settlement distance

