

# 基于水道迷宫的哈素海治理新理念

蓝霄峰<sup>1</sup> 贾婷<sup>2</sup> 黄代忠<sup>1</sup>

(1.珠江水利科学研究院, 广东广州, 510610;  
2.绍兴市上虞区水利工程管理所, 浙江绍兴, 312300)

**摘要:** 哈素海水库为补水型水库, 水库淤积和水质富营养化状况严重, 本文基于“水道迷宫”的基本思想, 提出“水沙分离、流水不腐”的哈素海治理新理念, 方案提出在民生渠、万家沟及轱辘畔河入哈素海口附近布置沉沙池, 哈素海西侧及北侧芦苇地修建迷宫水流通道。利用经验公式和二维水动力模型, 分析水道迷宫建成后对哈素海泥沙运动、水体交换的效果, 探讨其治理方案的可行性和合理性。结果表明: 按方案治理后, 携带大量泥沙的水体进入哈素海后, 泥沙将绝大部分在沉沙池沉淀; 水体通过水道迷宫流动, 加速了哈素海水体交换, 有利于改善哈素海的水环境。

**关键词:** 水道迷宫; 哈素海; 淤积; 富营养化

## 1 概述

哈素海位于内蒙古自治区呼和浩特市, 是因黄河变迁而遗留的牛轭湖, 属大黑河水系的外流淡水湖泊, 主要补给水源为黄河水和大青山洪调蓄后的部分洪水。黄河水携带了大量的泥沙入湖, 使得湖泊不断淤积, 而且由于河流水质不断恶化, 使得有机污染物和营养盐不断的进入哈素海<sup>[1]</sup>。近些年来, 研究人员对哈素海的沉积物<sup>[2]</sup>、浮游动植物<sup>[3]</sup>、鸟类群落<sup>[4]</sup>等开展了大量研究。哈素海的水体已经被有机物污染且营养化<sup>[5]</sup>, 水中营养元素丰富, 有利于芦苇等水生植物繁殖, 冬季芦苇和水草等水生植物的枯落物不断堆积在湖底, 缺氧条件下, 其分解很慢, 植物残体逐年累积, 将湖底将进一步抬高, 水体逐步变浅, 如果得不到遏制, 芦苇将会进一步向湖中心蔓延, 湖面将会不断缩小, 明水区可能消失, 最终湖泊演化为沼泽<sup>[6]</sup>。因此, 如何综合开发和科学治理哈素海, 已成为亟待解决的科学问题。

1992年赵晓霞<sup>[4]</sup>提出了对农业非点源污染及旅游进行定量控制; 1995年韩瑞梅<sup>[5]</sup>提出防治对策: ①控制和阻止外“源”, 尽量控制和减少山洪, 农田退水, 控制废弃物和生活污水排入湖中; ②控制和减少内“源”, 收割水草和苇蒲水下部分, 以防腐烂于湖中产生新营养物, 清淤、放养草鱼。③改变引黄河水入哈素海口和哈素海溢洪道位置。

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金资助(2018491111); 广州市科技计划项目(201906010078)

作者简介: 蓝霄峰(1976-), 男, 广西忻城, 高工, 主要从事水力学及河流动力学研究。[7470054@qq.com](mailto:7470054@qq.com)

1999 年李国庆<sup>[7]</sup>提出防治几点措施：加强宣传力度、提高环保意识；加强执法力度，加强管理；加强监测工作；加强宏观管理。

现阶段提出的治理建议主要为：工程措施为清淤、改变引黄河水入哈素海口和哈素海溢洪道位置；非工程措施主要为加强宣传、监测及管理。清淤为临时措施，改变引黄河水入哈素海口和哈素海溢洪道位置措施由于改道难、投资大，所以一直未能实施。为了改变哈素海淤积现状，改善其水环境，便于哈素海正常运行维护，本次提出了水道迷宫治理的新理念，在不改变引黄河水入哈素海口和哈素海溢洪道位置情况下，探索对哈素海的治理。

## 2 哈素海治理新理念

采用“水道迷宫”的基本思想，提出“水沙分离、流水不腐”的理念，即：  
①在引水入口设置沉砂池，将黄河水、山洪中的泥沙沉降分离，便于日常维护；  
②哈素海西侧及北侧芦苇地修建迷宫水流通渠道，加快水哈素海水体交换，遏制水体富营养化，缓解哈素海的淤积和水环境问题。

### 2.1 水沙分离分析

哈素海水源主要靠提黄河水和山洪补给。黄河水通过南岸民生渠供给，占水库年补水 75.7%；山洪通过北岸的轱辘河，万家沟、后河汇入。黄河水和山洪均为含沙量很大的水体，在民生渠和水库北侧引水入口设置沉砂池，水体在沉砂池内流速将降低，水流挟沙力减小，实现水沙分离。

### 2.2 水体交换分析

哈素海引黄河水进口，溢洪道都设在其南部，其北部大部分水长期处于死水状态，水体容易营养化。本次研究提出沿湖周边布置水体交换通道，芦苇区采用水道迷宫形式（如图 1），引导水流到达水库各个水域，加速水体交换。

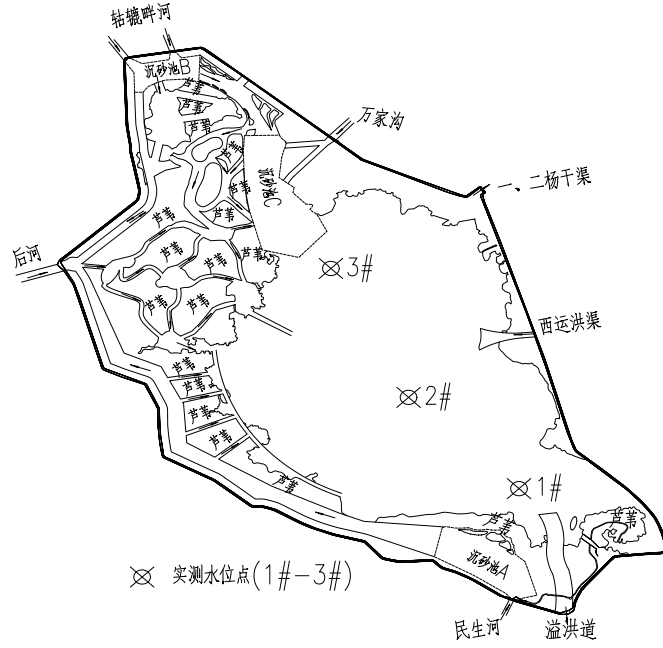


图1 水道迷宫方案

### 3 哈素海治理新理念可行性分析

#### 3.1 数学模型的建立

建立哈素海二维水动力数学模型，计算方案实施前后水体交换情况，同时为水沙分离效果分析提供流速等水动力参数取值依据。正交曲线坐标系下的二维水深平均水流数学模型如下形式<sup>[8]</sup>：

连续方程：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial (HU \sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial (HV \sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = \frac{Q}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \quad (1)$$

动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial U}{\partial \eta} = v_t \left( \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} \right) - \\ \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} - \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{UV}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \\ \frac{V^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + fV - C_w \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega^2 \frac{1}{H \sqrt{\gamma}} (x_\xi \cos \beta + y_\xi \sin \beta) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial V}{\partial \eta} = \nu_t \left( \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 V}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} \right) - \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} - \frac{gV\sqrt{U^2+V^2}}{C^2 H} - \frac{UV}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{V^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fU - C_w \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega^2 \frac{1}{H\sqrt{\alpha}} (x_\eta \cos \beta + y_\eta \sin \beta) \quad (3)$$

$$\frac{\partial [(d+\zeta)c]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)uc\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)vc\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = \frac{(d+\zeta)}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ D_h \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ D_h \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\} + (d+\zeta)S \quad (4)$$

式中： $\xi$ 、 $\eta$ 为曲线坐标系（无量纲）； $U$ 、 $V$ 分别为 $\xi$ 、 $\eta$ 方向的垂线平均流速，m/s； $\zeta$ 为水位（基准面到自由水面的距离），m； $c$ 为污染物浓度，kg/m<sup>3</sup>； $D_h$ 为污染物水平扩散系数，m<sup>2</sup>/s； $S$ 为单位时间内的污染物源汇项，kg/m<sup>3</sup>； $Q$ 为面积上的水流源汇项，m<sup>3</sup>/s； $d$ 为相对于基准面的静水深，m； $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ 、 $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 为曲线坐标到直角坐标的变换参数，m； $\rho$ 为水体密度，kg/m<sup>3</sup>； $f$ 为柯氏系数，s<sup>-1</sup>； $g$ 为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $C_w$ 为风应力的拖拽系数； $\beta$ 为风向与x轴的夹角； $\nu_t$ 为紊动粘性系数，m<sup>2</sup>/s； $t$ 为时间s。

### 3.2 数值计算方法

二维水流数学模型中的偏微分方程可以写为如下形式：

$$M \frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial t} + 2A \frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial x} + 2B \frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial y} = \frac{\partial^2 \phi^{n+1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi^{n+1}}{\partial y^2} + S \quad (5)$$

式中各物理符号的含义见文献[9]，采用混合有限分析法进行离散<sup>[9]</sup>，此处采用C型网格结合SIMPLER算法用于速度和水位的耦合求解。

### 3.3 数学模型的验证

哈素海内水生植物主要为芦苇，不同区域密度也不同，根据已有研究成果<sup>[10]</sup>，结合哈素海芦苇实际情况茂密芦苇区糙率取0.11、零星芦苇区取0.032，水域取0.023，为对模型进行验证，水文边界采用2015年10月引黄河水流量为18.4m<sup>3</sup>/s，下边界为哈素海正常蓄水位（991.00m），采用本模型进行了模拟计算，统计水位计算值与实测见表1所示，两者差距在2cm以内。

表 1 2015 年引黄河水实测与计算差值统计

实测点	1#	2#	3#
与溢洪道距离/km	1.0	2.5	3.5
实测值/m	991.13	991.24	991.36
计算值/m	991.12	991.24	991.38
实测值-计算值/m	0.01	0.00	-0.02

### 3.4 计算水文组合

根据哈素海运行调度情况及当地水文气象情况，本次选取洪季山洪入库及枯季引黄河水两种典型工况进行研究，洪季山洪入库工况各河道洪季多年平均流量，枯季引黄河水流量取 20.0m<sup>3</sup>/s。

### 3.5 水体交换效果分析

假设每个计算单位初始水量为 C(t<sub>0</sub>)。则不同时刻置换比率计算公式为：

$$R(x, y, t) = (C(t_0) - C(t)) / C(t_0)$$

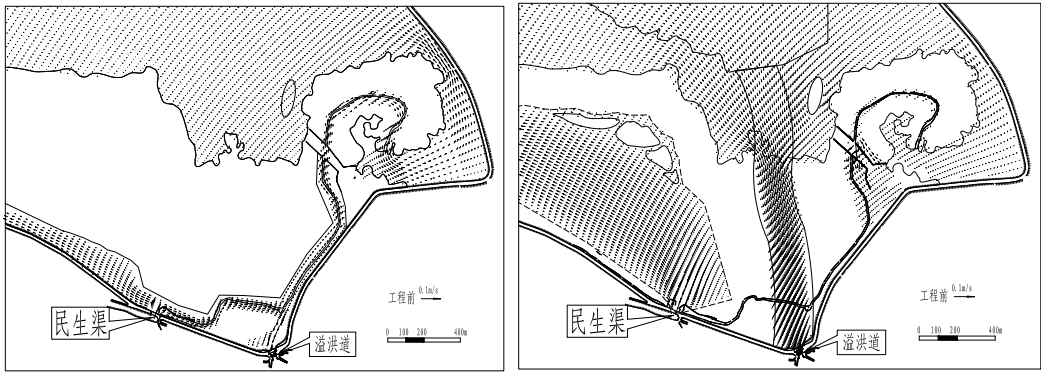
con=1.0 为水体初始状态，未交换；con=0.0 为水体完全交换，0.0<con<1.0 为水体部分交换，数值越小水体交换程度越大，研究时间为 30 天。

哈素海水体交换主要通道是南部的溢洪道，图 2 为方案实施前后洪季溢洪道附近水域流场，图 3 为洪季方案实施前后水库各水域水体交换情况。图 4 为方案实施前后枯季黄河引水溢洪道附近水域流场，图 5 为方案实施前后枯季黄河引水水库各水域水体交换情况。从流场图可以看出，现状情况下，民生渠进入哈素海的水体部分直接经溢洪道下泄。从水体交换效果图来看，方案实施后民生渠水体可以较好的置换哈素海水体，明显加快哈素海的水体交换。

表 2 为水体交换成果统计表，从表中可以看出，实施水道迷宫后，哈素海水体交换量会增加，特别枯季引黄河水工况。

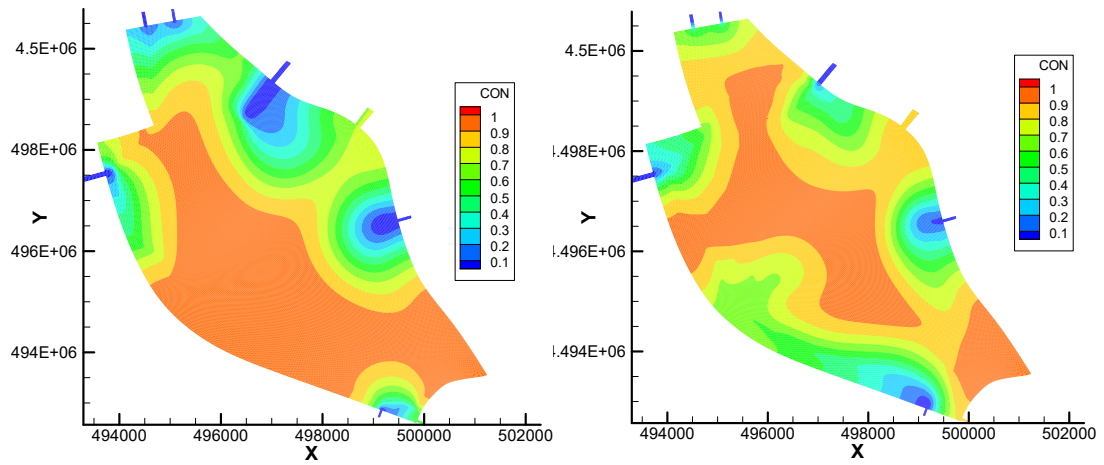
表 2 哈素海各工况下水体置换情况表

项目	洪季工况	枯季引黄河水工况
现状水体交换量/m <sup>3</sup>	946.3	2816.8
实施水道迷宫后水体交换量/m <sup>3</sup>	1001.2	4401.2
增加百分比/%	5.80	56.25



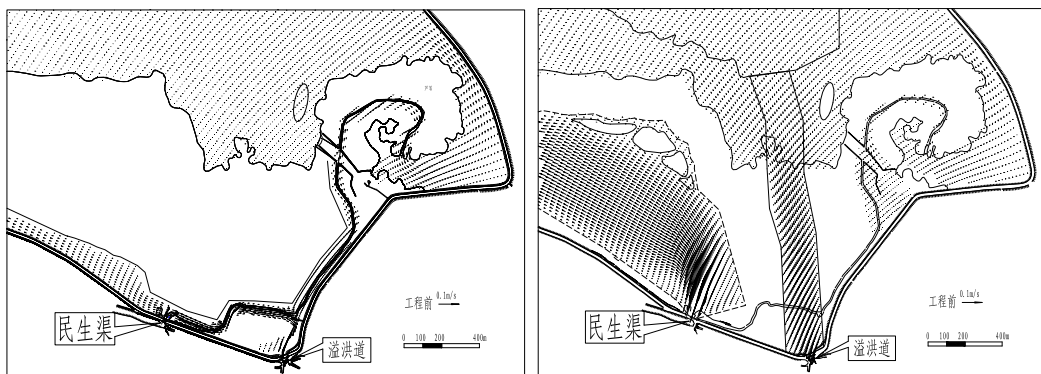
(a) 现状 (b) 方案实施后

图2 洪季溢洪道附近流场图



(a) 现状 (b) 方案实施后

图3 洪季30天水体交换效果图



(a) 现状 (b) 方案实施后

图4 枯季引黄河水溢洪道附近流场图

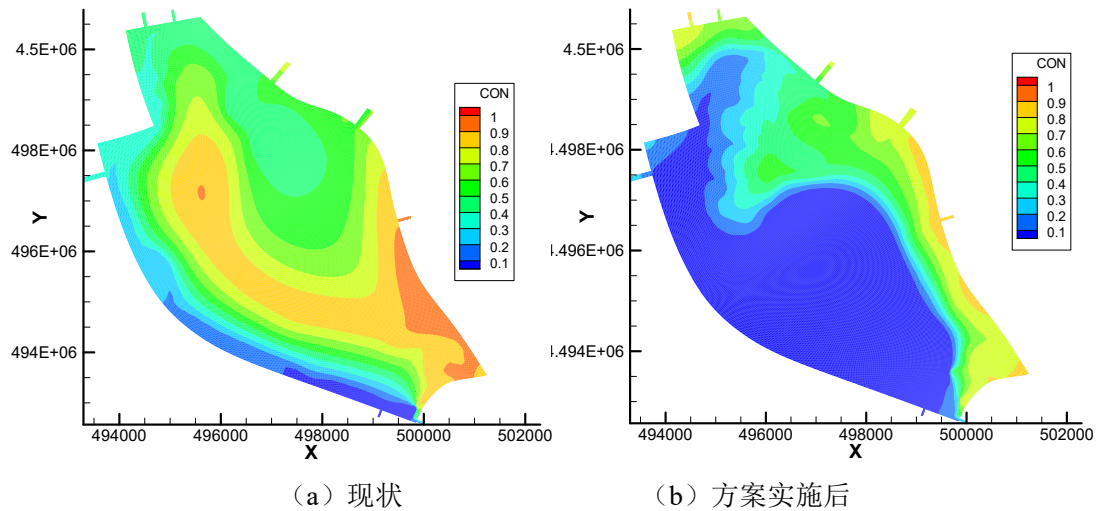


图5 枯季引黄河水30天水体交换效果图

### 3.6 水沙分离效果分析

哈素海水沙分离效果采用经验公式进行分析，泥沙的沉速均采用张瑞瑾公式计算：

$$\omega = \sqrt{\left(13.95 \frac{\nu}{d}\right)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} - 13.95 \frac{\nu}{d}$$

式中： $d$ 为泥沙平均粒径， $\nu$ 为水的运动粘滞性系数， $\rho$ 、 $\rho_s$ 分别为水和泥沙密度。

泥沙的起动流速均采用张瑞瑾公式计算：

$$U_{ck} = \left(\frac{h}{d_k}\right)^{0.14} \left[ 17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_k + 6.05 \times 10^{-7} \left(\frac{10+h}{d_k^{0.72}}\right) \right]^{0.5}$$

式中： $d_k$ 为第 $k$ 组沙平均粒径， $h$ 为断面平均水深， $\rho$ 、 $\rho_s$ 分别为水和泥沙密度。

水流挟沙力公式采用黄河干支流水流挟沙力公式计算：

$$S_{pj} = \frac{1.07U^{2.25}}{R^{0.70}\omega^{0.77}}$$

式中： $S_{pj}$ 为断面平均含量(kg/m<sup>3</sup>)， $U$ 、 $R$ 及 $\omega$ 分别为断面平均流速(m/s)、水力半径(m)及泥沙的水力粗度(cm/s)。

根据两个口门泥沙取样资料，可以计算出泥沙特性。

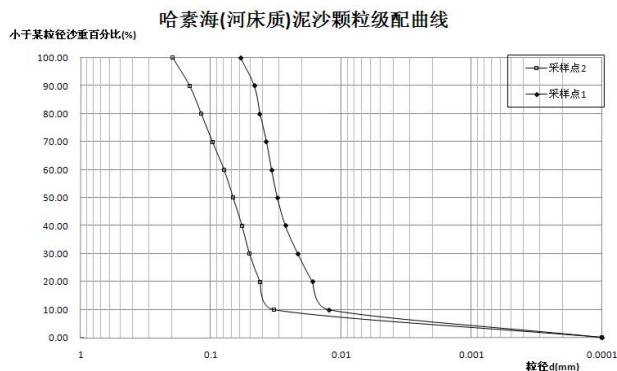


图 6 采样点泥沙颗粒级配

表 3 泥沙特征表

口门	泥沙中值粒径/ $(10^{-3}\text{mm})$	沉速/ $(\text{cm/s})$	起动流速/ $(\text{m/s})$	平均流速/ $(\text{m/s})$		水流挟沙力/ $(\text{kg/m}^3)$	
				洪季	黄河引水	洪季	黄河引水
民生渠	30.85	0.06	0.60	0.220~0.012	0.410~0.060	0.002	0.115
万家沟	67.54	0.29	0.44	0.01	0.01	0.0002	0.0002

从表 3 中可知，两个缓淤区起动流速均比平均流速大，泥沙大部分会在沉砂池沉降，只有少部分冲泻质，随水流进入水库。根据泥沙颗粒级配、沉速及水流挟沙力可以估算，民生渠补水口沉砂池拦沙率为 98.65%；万家沟沉砂池拦沙率为 84.92%。

#### 4 结语

(1) 采用水道迷宫方案治理哈素海后，可以提高其水体交换速度，特别是引黄河水情况下，有利于改善水环境。

(2) 哈素海补水主要来自黄河水及山洪，均为含沙量很大的水体，从分析来看，在民生渠口门和万家沟、轱辘河口设置沉砂池可以拦截大部分泥沙，实现水沙分离，可以有效延缓哈素海的淤积。

#### 参考文献

- [1] 孙标, 杨志岩, 赵胜男, 8 个时期哈素海芦苇群落扩张状况及其原因分析[J], 湿地科学, 2016,14(6):931-935.
- [2] 沈丽丽, 何江, 吕昌伟, 等, 哈素海表层沉积物中内源磷的释放研究[J], 农业环境科学学报, 2009,28(6):1219-1224.
- [3] 王俊, 赵林, 哈素海浮游动物群落结构季节变化规律研究[J], 内蒙古师范大

学学报（自然科学汉文版），2012, 41(5):511-517.

[4] 格日乐图，吉格迷德，哈素海鸟类调查研究[J]，内蒙古师范大学学报（自然科学汉文版），1999,28(2):146-151.

[5] 韩瑞梅，姚亦淳，韩瑞清，哈素海富营养化及防治对策[J]，内蒙古农牧学院学报，1995 16(2):78-82.

[6] 汪敬忠，吴敬禄，曾海鳌，等，内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析[J]，干旱区研究，2015,32(1):1-14.

[7] 李国庆，哈素海水域的污染现状及其防治建议[J]，内蒙古环境保护，1999,11(3):34-36.

[8]方神光，黄胜伟，纯隐格式的混合有限分析法在广雅桥水流数值模拟中国的应用[J]，水利水电科技进展，2010,30(6):53-57.

[9]李炜，粘性流体的混合有限分析解法[M],北京：科学出版社，2000.

[10] 顾峰峰，倪汉根，芦苇密度与阻力的关系[J]，水动力学研究与进展，A辑 2006 21(5):626-631.

[11] 王兴奎,邵学军,李丹勋.河流动力学基础[M].北京:中国水利水电出版社, 20023.

## A new lake treatment strategy for Hasuhai Lake based on channel maze

Lan Xiao-feng<sup>1</sup> JiaTing<sup>2</sup> HuangDai-zhong<sup>1</sup>

(1.The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510610, China  
2.Shaoxing Shangyu District Water Conservancy Project Management Office,  
Shaoxing, 312300, China )

Abstract: Hasuhai Lake is an water supplement lake. Sedimentation deposition makes the lake storage capacity be decreasing, and water eutrophication makes the lake water environment be worsening. In this paper, a new lake treatment concept is proposed for Hasuhai Lake based on channel maze, including sediment settling in the reserve zone, running water never becoming putrid. The reserve zones will be built near the inlet of the Min-sheng river, Wan-Jia river and Ku-lu-pan river. The channel maze will be built in the west and the north of Hasuhai. The impact of channel maze in the Hasuhai Lake on sediment movement and water exchange are numerically investigated by a two-dimensional hydrodynamic model and some experiential formulas, and the feasibility and the rationality of its application is also discussed. The

results show that when the recharge water, carrying a lot of sediment, comes into the Hasuhai Lake, most of sediment will deposit in the reserve zone, which is better to the lake maintenance. Water will be flowing through the channel maze, and water exchange will be accelerated, resulting in better water environment.