

# 引滦输水过程中悬浮物的沉降迁移特征

张庆强, 周潮晖, 傅建文, 侯钰阔, 杜乔乔

(天津市水文水资源勘测管理中心, 天津 300061)

**摘要:** 受黎河河道两岸铁矿砂影响, 引滦输水黎河段水体中悬浮物含量远远高于引滦入津隧洞出口水的悬浮物含量。本文对引滦输水过程中悬浮物的沉降迁移特征进行了研究。结果表明: 影响水体中悬浮物沉降速率的主要因素为悬浮颗粒粒径, 影响悬浮物迁移量的主要因素为悬浮物的初始浓度。结合引滦输水过程中的悬浮物实际迁移情况, 得出悬浮物主要影响引滦输水黎河河道, 而汇入于桥水库的悬浮物含量较少且主要为粒径  $< 10\mu\text{m}$  的颗粒。应用研究成果, 针对引滦输水工程的悬浮物污染特征, 提出降低输水过程流速、增加入库前河道深度及种植水生植物等建议, 以减少引滦输水过程中悬浮物含量。

**关键词:** 悬浮物; 静沉降; 迁移特征; 引滦输水

中图分类号: X832

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0091-04

## Settlement and transport characteristics of suspended solids in process of Luanhe – Tianjin water diversion

ZHANG Qingqiang, ZHOU Chaohui, FU Jianwen, HOU Yukuo, DU Qiaojiao

(Tianjin Survey and Management Center of Hydrology and Water Resources, Tianjin 300061, China)

**Abstract:** Impacted by the riverside iron ore of Lihe river, the suspended matter content of Lihe river water body is much higher than that tunnel at exit of Luanhe – Tianjin water diversion. This article studied the settlement behavior and transport characteristics of suspended solids in process of LuanHe – TianJin Water diversion. The results show that the main factor that affect settling velocity of suspended matter is particle size, and the main factors influencing the removal rate of suspended solids content is initial concentration of suspended solids. Combining the reality of suspended solids transport in process of LuanHe – TianJin Water diversion, the paper got the conclusion that suspended solids mainly affect the riverside of Lihe river Luanhe – Tianjin water diversion, the content of suspended solids flowing into the YuQiao reservoir is fewer and is mainly their particle size of  $< 10$  microns particles. In light of the pollutant feature of suspended solids in the water diversion, the paper put forward to reduce flow speed of water process, to increase the depth of GuoHe river and to grow aquatic plants before water into YuQiao reservoir so as to reduce the content of suspended solids.

**Key words:** suspended solid; hydrostatic settling; transport feature; Luanhe – Tianjin water diversion

悬浮物主要来源于流域的水土流失以及水体中沉积物的再悬浮作用, 水体悬浮物的含量增加, 不仅影响水体透明度<sup>[1]</sup>, 同时悬浮物颗粒物还是各种污染物在水体中的重要存在介质, 对于污染物在水生生态系统中的迁移、分布起着重要的作用<sup>[2]</sup>。

水体中悬浮物颗粒物的沉降速率除与粒径密切相关外, 还受多种环境因素的影响, 有关这方面的研究近年来日益受到国际上的重视。悬浮物组成、含

量以及水环境化学特征的不同通过物理、化学、生物的作用影响颗粒物的絮凝能力, 进而影响其沉降速率。已有的研究成果主要集中于海洋、港口、河口等<sup>[3-6]</sup>, 而针对间隔式输水的河道中悬浮物产生、迁移及对汇入水库水源地的影响情况报道较少。

黎河是引滦入津输水工程进入于桥水库水源地的唯一天然河道, 其水生态及水环境对进入水库的水体有着重要的影响。黎河河道上游两岸大量尾矿

收稿日期: 2016-01-26; 修回日期: 2016-03-22

基金项目: 天津市水务局科技项目 (KY2013-12)

作者简介: 张庆强 (1982-), 男, 河北青县人, 硕士, 工程师, 主要从事水环境监测方面研究。

砂堆积<sup>[7-8]</sup>,受运输扬尘、降雨冲刷以及选砂废水排入等影响,造成大量尾矿砂进入黎河河道。引滦输水过程中悬浮物随输水迁移沉降,不仅造成下游河道淤积,使河道行洪能力大大降低,同时悬浮物含量增高对水质产生影响<sup>[9-10]</sup>,颗粒较小的颗粒会随着引滦输水进入到于桥水库,对水库水环境产生影响<sup>[11]</sup>。本文通过对引滦输水过程中悬浮物沉降规律的研究,确定引滦输水中悬浮物的迁移能力,从而提出降低引滦输水过程中悬浮物含量的建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源

分别于2013年5月22日、2014年4月15日,无风且天气晴朗条件下,在引滦输水黎河河道黎河桥断面采集样品。样品采集时河道输水流量均为60 m<sup>3</sup>/s。

### 1.2 静沉降实验装置

采用图1中所示内径12 cm,截面积113 cm<sup>2</sup>,高100 cm的有机玻璃柱沉降筒,由8只相同沉降筒各自独立完成实验<sup>[12]</sup>。考虑样品采集时水体中悬浮物受冲刷影响情况,由上至下设置3个取样位置<sup>[13-14]</sup>,取样点 $h_1$ 距沉降筒顶端、中间层 $h_2$ 距 $h_1$ 、 $h_3$ 距 $h_2$ 均为30 cm,底层取样点 $h_3$ 距筒底10 cm。

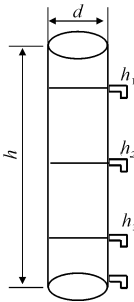


图1 沉降实验装置简图

### 1.3 静沉降实验过程

水样注入沉降筒之前,先摇匀原水水样,测定原水悬浮物含量,记录各沉降筒注水时间。实验过程中,每只沉降筒分别于 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 的位置,采用虹吸法进行取样,各深度取样体积均为100 mL,每只筒不同深度仅采集一次。取样时间间隔为0、10、20、40、80、110、120、160、240、320、480、960、1 200、1 440、2 880 min,按不同时间间隔分批进行实验。实验期间水温基本保持在25℃左右。

### 1.4 测定项目及分析方法

悬浮物含量测定按照《水质 悬浮物的测定 重

量法(GB11901-1989)》测定。悬浮物粒径由岛津SALD-2300型激光颗粒仪测定。

### 1.5 沉降速率及迁移计算方法

自由沉降过程可以由斯托克公式进行描述,即:

$$v = K \frac{1}{18 \times 10^4} \cdot \frac{G_s - G_{WT}}{\eta} \rho_w g d^2 \quad (1)$$

式中: $v$ 为颗粒的沉速,cm/s; $K$ 为形状修正系数; $G_s$ 为土粒比重; $G_{WT}$ 为 $T^\circ\text{C}$ 时水的比重; $\eta$ 为水的动力粘滞系数,20℃时为 $1.00374 \times 10^6$ ;  $\rho_w$ 为4℃时纯水的密度,g/cm<sup>3</sup>; $g$ 为重力加速度,cm/s<sup>2</sup>; $d$ 为颗粒的粒径,cm。

一维河道水流挟沙力大小,常采用张瑞瑾公式<sup>[15-16]</sup>:

$$S_* = K \left( \frac{U^3}{gR\omega} \right)^m \quad (2)$$

式中: $S_*$ 为悬移质水流挟沙能力,kg/m<sup>3</sup>; $U$ 为断面平均流速,m/s; $R$ 为水力半径,m; $\omega$ 为泥沙沉降速度,m/s; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $m$ 、 $K$ 为指数和系数,一般由实测资料确定。对于宽浅河道 $R$ 可以近似用断面平均水深 $h$ 代替。

## 2 结果与讨论

### 2.1 输水过程中悬浮物沉降特征讨论

2013年5月引滦输水样品中悬浮物含量为690 mg/L,2014年4月样品悬浮物含量为87 mg/L。静沉降实验模拟结果显示,水体中悬浮颗粒物的含量与时间之间呈现出幂指数衰减的相似规律,以2013年5月水样实验结果为例,如图2所示。在静沉降实验初期各取样点的悬浮颗粒物降幅最大,后期降幅逐渐变缓,可以看到240 min内,悬浮颗粒物浓度下降了90%。垂直方向上,前100 min内同一时刻沉降筒的3个不同高度的悬浮物含量变化,为下层悬浮物含量>中层悬浮物含量>上层悬浮物含量,且3个层位悬浮物的含量值初期大于沉降后期,反映出了悬浮颗粒物沉降过程中的浓度分布规律。

由图2可见,水体中悬浮物的含量小于100 mg/L时,悬浮物含量随时间的变化趋于平缓。考虑水体中悬浮物含量对沉降速度的影响因素,2014年4月选取引滦输水中悬浮物含量较少的时期取样,重复相同的静沉降实验。结果见图3,可以看出两次的沉降规律基本相同,均为开始沉速较快,后期趋于平缓。

由斯托克公式可以看出,影响悬浮物沉降速度的因素主要为颗粒物的粒径及颗粒的密度。对比图

2、图3,引滦输水中悬浮物的沉降速度与悬浮物的浓度间关系不明显。由图4所示水体悬物粒径与沉降时间关系所示,随沉降时间变化水中悬浮物粒径大的悬浮颗粒沉降时间较短,粒径小的颗粒沉降时间较长。因此引滦输水过程中悬浮物沉降速度的主要影响因素为颗粒物的粒径。

水体中悬浮物去除率与悬浮颗粒物的含量和粒径成正比,当水体中悬浮颗粒的含量降到一定程度,且粒径微小时,颗粒物在水体中呈现出不规律性的活动,因此这一部分悬浮物是水体中最难沉降去除

的部分。

由图5水体中悬浮物去除率与沉降时间关系可以看出,两次不同浓度的沉降模拟实验中,悬浮物含量去除率达到90%的时间均为240 min。对比两组实验,其差别为水样的初始悬浮物含量,由实验结果得知沉降320 min后,2013年5月水样中悬浮物的含量20 mg/L,2014年4月水样中悬浮物含量为4 mg/L,至960 min后两批水样中悬浮物浓度基本达到相同含量。因此说明悬浮物含量越高,悬浮物的去除时间越长,随水体迁移的悬浮物含量越多。

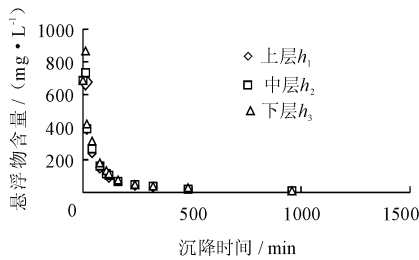


图2 2013年5月水体悬浮物含量与沉降时间关系

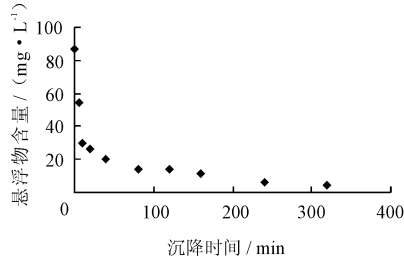


图3 2014年4月水体悬浮物含量与沉降时间关系

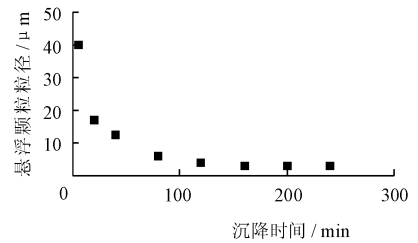


图4 2014年4月水体悬浮物粒径与沉降时间关系

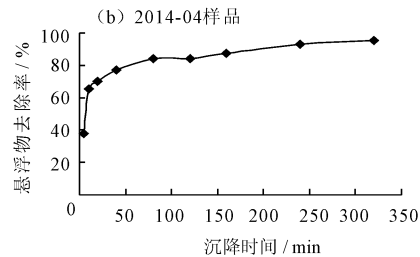
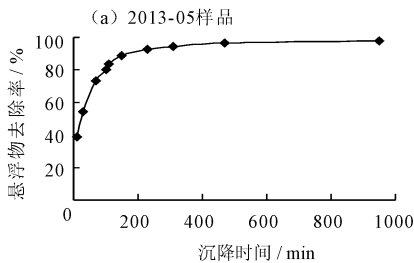


图5 引滦输水过程水体中悬浮物去除率与沉降时间关系

## 2.2 引滦输水过程中悬浮物迁移规律讨论

根据张瑞谨公式所示,对于同一河道而言,悬移质中的床沙质基本稳定,水流挟沙力的大小主要受水流流速大小的影响。引滦黎河输水期间,水文实测资料,当输水流量为60和30 m<sup>3</sup>/s左右时,黎河桥断面的实测流速在1.02和0.87 m/s左右;下游果河桥断面的实测流速为0.50和0.20 m/s。可见果河桥断面流速相比黎河桥断面下降了51.0%~77.0%。假定黎河输水初期的水流悬移质含沙量为饱和含沙量,理论上受水体的流速影响,水流挟沙能力从黎河桥至果河桥断面相对减小,则在黎河桥以下段的水体中1/2~3/4的悬移质床沙开始淤积沉降。

应用激光粒径仪测得2013年5月输水初期水体中悬浮颗粒的粒径主要在0.02~0.05 mm间。水体悬浮物经富集后检测得到,黎河桥悬浮物中有机质含量仅为13.3 g/kg,因此悬浮物的沉降以无机质为主。同时悬浮物以矿砂为主,颗粒间的絮凝作

用较弱,颗粒的静水沉降符合自由沉降规律,但尾矿砂为多角形不规则的颗粒,其并不完全符合斯托克沉降公式计算要求,应用岗恰洛夫研究成果,对矿砂沉速计算中取系数 $K$ 值为0.75<sup>[17-18]</sup>,通过对引滦输水中悬浮物的粒径组成进行分析,计算不同粒径的悬浮颗粒沉降速度,具体结果见表1。

黎河桥至果河桥断面,河道流速变缓,至汇入于桥水库前的河道段内,河道变宽、深度增加、流速进一步平缓稳定。因此水体搅动能力、对底质的冲刷影响下降,挟沙能力降低。水体中悬浮物沉降在不考虑水体扰动的前提下,近似为自由沉降。假设黎河桥断面下游至果河桥断面河道平均水深2 m,近似均匀流动的河道段,平均流速按果河桥断面0.5 m/s,此段河长约为3.7 km,由此计算出粒径大于0.020 mm的颗粒物能沉降于此段河道中,占有悬浮颗粒的81.9%。

根据输水期间的实测悬浮物含量,2013年全年

引滦输水期黎河桥断面的悬浮物含量均值为 207 mg/L,果河桥断面的悬浮物含量均值为 28 mg/L,水中悬浮物的沉降量为 86.5%。2014 年输水期黎河桥断面的悬浮物含量均值为 32 mg/L,果河桥断面的悬浮物含量均值为 12 mg/L,水中悬浮物的沉降量为 62.5%。与实验模拟结果基本相同,由此黎河桥断面至果河汇入于桥水库的距离约为 16 km,应用表 1 中所列悬浮物沉降速率计算,进入于桥水库的悬浮物含量为较小一部分,且悬浮颗粒物以粒径  $< 10 \mu\text{m}$  的颗粒为主。

表 1 引滦输水过程水体中悬浮颗粒沉降速度

粒径/mm	沉降速率/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	粒径所占比例/%
$> 0.100$	$> 0.6738$	18.4
0.080	0.4312	7.5
0.060	0.2426	6.2
0.050	0.1684	15.9
0.030	0.0606	13.5
0.020	0.0270	20.4
0.010	0.0067	4.1
0.008	0.0043	6.4
0.005	0.0017	4.1
0.003	0.0006	1.9
$< 0.003$	$< 0.0006$	1.6

### 3 结论及建议

(1)通过静沉降实验模拟结果,引滦输水过程水体中悬浮沉降与时间之间呈现出幂指数衰减的规律。

(2)通过静沉降对比实验结果得知,引滦输水过程水体中悬浮物的沉降速度主要受悬浮物粒径影响。悬浮物初始含量越大,粒径越小,迁移距离越远。

(3)结合实际监测工作,应用静沉降分析结果,得出引滦输水中悬浮物大部分沉降于黎河桥至果河桥段,随输水进入于桥水库的悬浮物为小部分且粒径  $< 10 \mu\text{m}$  悬浮颗粒。

为控制引滦输水过程悬浮物的迁移量,提高引滦输水水质,在加强引滦输水工程沿线矿砂治理工作的同时,结合研究成果,提出针对引滦输水工程的悬浮物防治管理建议:

(1)降低引滦输水过程水流速度,以降低水体对黎河底质的冲刷,从而降低水体的挟沙量,同时降低了悬浮物沉降过程的再搅动。

(2)定期清理入库前河道底部泥沙,以保证河

道畅通的同时并为悬浮物提供足够的沉降空间,从而减少河道底部的再次冲刷影响。

(3)增加入库前河道中的植物量,减缓水流速度的同时,对粒径小的悬浮颗粒物起到吸附作用。

### 参考文献:

- [1] 徐京萍,张柏,蔺钰,等. 结合高光谱数据反演吉林石头口门水库悬浮物含量和透明度[J]. 湖泊科学, 2007, 19(3):269-274.
- [2] 马骁轩,冉勇,孙可,等. 珠江水系两条重要河流水体中悬浮颗粒物的有机污染物含量[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 378-383.
- [3] 陈勇,韩震,杨丽君,等. 长江口水体表层悬浮泥沙时空分布对环境演变的响应[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 145-152.
- [4] 刘涛,石学法,刘焱光,等. 悬浮体粒度特征反映的南黄海辐射沙脊群泥沙扩散趋势[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1):32-38.
- [5] 庞重光,于炜,杨扬. 长江口海域悬浮物的粒度特征与成因分析[J]. 环境科学, 2010, 31(3):618-625.
- [6] 车志伟. 三亚河入海口与感潮河段悬浮物分布特征及潮汐之影响[J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(6): 89-92.
- [7] 杨丽敏,樊建超. 黎河水质变化分析及污染防治对策探讨[J]. 海河水利, 2010(4):23-25.
- [8] 程强,杨丽萍,张彤宇. 尾矿砂对引滦黎河及于桥水库的影响研究[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(10):42-45.
- [9] 周海明,梁秋云,张帅. 浅谈尾矿对黎河水环境的影响[J]. 水利技术监督, 2011(5):24-26.
- [10] 张彤宇,高雷,程强. 尾矿砂对引滦水质的影响研究[J]. 海河水利, 2013(1):23-25.
- [11] 傅建文,张庆强,王立亚,等. 引滦输水污染物特征及对桥水库水质影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5):151-154.
- [12] 王宏,张林军. 颗粒自由沉淀试验方法的分析[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(8):45-47.
- [13] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3):266-271.
- [14] 陈鋈,高光,李一平,等. 太湖水体中悬浮物的静沉降特征[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5):528-534.
- [15] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1998.
- [16] 王玲玲,刘兰玉,姚文艺. 水流挟沙力计算公式比较分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(4):33-35.
- [17] 封光寅,章厚玉,张孝军,等. 泥沙群体颗粒平均粒径及平均沉速计算方法的修正[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6):36-38.
- [18] 赵德招,陈立,周银军,等. 单颗粒泥沙沉速公式的对比研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(1):36-37+40.