

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.023

# 保障望虞河引调水期水质的引水顶托条件研究

徐凌云<sup>1</sup>, 逢 勇<sup>2,3</sup>, 付 浩<sup>4</sup>

- (1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
4. 江苏省住房和城乡建设厅城市规划技术咨询中心, 江苏 南京 210013)

**摘要:**在现场调研和资料搜集的基础上,利用 MIKE11 模型建立望虞河西岸一维河网水环境数学模型,开展了望虞河西岸区域污染物总量控制计算和引水顶托条件分析,研究如何在望虞河西岸总量控制不达标的环境下通过引水顶托条件的研究来保证引调水期间望虞河入太湖水质达标。结果表明:①近期望虞河西岸污染物限排总量控制目标仍然无法实现;②当水位差值低于控制水位差时,望虞河引水;当水位差高于控制水位差时,西岸排水;③方案 1 情况下望虞河从长江连续引水 19 d 后需要对西岸进行一次排水;方案 2 情况下望虞河从长江连续引水 24 d 后需要对西岸进行一次排水;方案 3 情况下望虞河从长江连续引水 10 d 后需要对西岸进行一次排水;方案 4 情况下望虞河从长江连续引水 15 d 后需要对西岸进行一次排水。

**关键词:**MIKE11 模型;水质;引调水期;污染物总量控制;引水顶托条件;水位差;望虞河

**中图分类号:**X52      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2016)03-0121-06

## Study of diversion backwater conditions for ensuring water quality of Wangyu River during water diversion period

XU Lingyun<sup>1</sup>, PANG Yong<sup>2,3</sup>, FU Hao<sup>4</sup>

- (1. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China;  
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
4. Urban Planning Technology Consulting Center of Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** Based on field investigation and data collection, a one-dimensional river network water environmental mathematical model for the west bank of the Wangyu River was established using the MIKE11 software. Total pollutant load control calculation and diversion backwater condition analysis were carried out. This study shows how to guarantee the quality standards of the water flowing from the Wangyu River into Taihu Lake during the water diversion period through study of the diversion backwater conditions, when the total pollutant load control on the west bank of the Wangyu River does not meet the standards. The results are as follows: (1) Total pollutant load control cannot be implemented on the west bank of the Wangyu River in the near future. (2) When the water head is lower than the control level, water diversion in the Wangyu River should be conducted; when the water head is higher than the control level, drainage should be conducted on the west bank. (3) In Scheme 1, drainage is required on the west bank after water diversion of the Wangyu River from the Yangtze River for 19 days; in Scheme 2, drainage is required on the west bank after water diversion of the Wangyu River from the Yangtze River for 24 days; in Scheme 3, drainage is required on the west bank after water diversion of the Wangyu River from the Yangtze River for 10 days; and in Scheme 4, drainage is required on the west bank after water diversion of the Wangyu River from the Yangtze River for 15 days.

**Key words:** MIKE11 model; water quality; water diversion period; total pollutant load control; diversion backwater conditions; water head; Wangyu River

基金项目: 国家自然科学基金(51179053); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-006-05)

作者简介: 徐凌云(1988—), 女, 工程师, 主要从事环境影响与评价工作。E-mail: xly@sidri.com

望虞河位于太湖流域阳澄淀泖区和武澄锡虞区的交界处(图1),是流域综合治理骨干工程之一,是太湖流域“引江济太”的重要调水通道<sup>[1]</sup>,总长60.8 km。引江济太调水试验经望虞河调引水质相对优良的长江水体进入太湖,并通过太浦河由太湖向上海等下游地区供水<sup>[2-3]</sup>。望虞河入湖、入江口分别设有望亭立交水利枢纽和常熟水利枢纽,望虞河是澄锡虞区与阳澄淀泖区高低片的界河<sup>[1]</sup>,望虞河东岸沿线有51条大小支流,全部有闸控制,引江济太期间大部分处于关闭状态,部分开闸的也因地势、水位等原因以出流为主,不排水入望虞河,西岸支河口门为兼排地区涝水,仅北部靠近长江的福山塘以北段和南部嘉菱荡以南部分支河控制外,其余均为敞开<sup>[4]</sup>。

望虞河西岸属典型的平原河网区,河港纵横交错,水系交叉相连,北至长江、南至京杭运河、西至锡澄运河、东至望虞河,行政区域包括无锡市市区和新区、江阴市、锡山区、惠山区、常熟市和张家港等7个地区。目前望虞河西岸地区仍存在污水未达标排放、污染物排放总量超过了水功能区纳污能力等现象,西岸地区生活、工业污水大量排放并由支流汇入望虞河,对望虞河引江济太改善太湖水质造成了严重影响。因此,必须制定一定的对策措施以保证望虞河引调水期入太湖的水质能够达标。笔者以MIKE11模型为工具,建立望虞河西岸一维河网数学模型,在此基础上制定包括总量控制、引调水调度、有效监管在内的对策措施,由此对引调水期间望虞河入太湖水质达标的保障性进行探讨。

在水文、水质例行监测基础上,利用丹麦水力学所的MIKE11软件建立了望虞河西岸河网水动力-水质数学模型,模拟望虞河西岸水环境,并利用所建立的模型就望虞河对西岸来水的顶托条件和望虞河引排条件进行研究分析。



图1 研究区域位置

## 1 水动力与水质模型的建立

MIKE11是一款多功能的一维水动力学软件,

以求解圣维南(Saint-Venant)方程组作为理论基础<sup>[5]</sup>,有水动力、对流扩散、水质生态、泥沙传输、降雨径流、洪水预报、实时操作等多种模块。本文采用MIKE11模型中的水动力(HD)模块、对流扩散(AD)模块来构建望虞河西岸水动力-水质模型。

### 1.1 水动力模型

水动力模块中描述一维非恒定水流运动规律的控制方程组为圣维南方程组,由质量守恒的连续性方程和能量守恒的动量方程组成<sup>[6]</sup>,分别为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: $x$ 为距离坐标; $t$ 为时间坐标; $A$ 为过水断面面积; $Q$ 、 $h$ 分别为流量及水位; $q$ 为旁侧入流量; $\alpha$ 为动量系数,一般取1; $C$ 为谢才系数; $R$ 为水力半径; $g$ 为重力加速度。

由于HD模型采用Abbott六点隐式格式离散上述微分方程组,因此模型可在相当大的courant数下保持计算的稳定性,以取得更长的时间步长、节省计算时间。河道上每个网格点上水位和流量并不同时计算,而是按顺序交替布置水位点和流量点,采用隐式的有限差分法分别进行计算<sup>[7]</sup>。

### 1.2 水质模型

对流扩散模块的控制方程是建立在质量守恒基础上的对流扩散方程,该方程假设物质在断面上完全混合。

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(A\rho)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] = -AK_p + \rho_2 q \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为水流输送物质的浓度; $E_x$ 为纵向扩散系数; $\rho_2$ 为源/汇项的浓度; $K_p$ 为污染物降解系数。

MIKE11对流扩散模块利用时间和空间中心隐式差分格式<sup>[8]</sup>求解上述方程。

## 2 模型建立及率定验证

### 2.1 模型的建立

在充分掌握望虞河西岸平原河网水动力、水文资料的基础上,以主干河道为基础,按照河网概化的基本原则,对望虞河西岸河网进行了合理的概化。望虞河西岸河网概化见图2。

模型计算范围涵盖整个望虞河西岸地区,共设置29个计算边界,所有边界水动力条件均采用2012全年水位过程。

本次污染源条件在统计2012年望虞河西岸污染源的基础上,点源按其排污口所在河道输入模型,

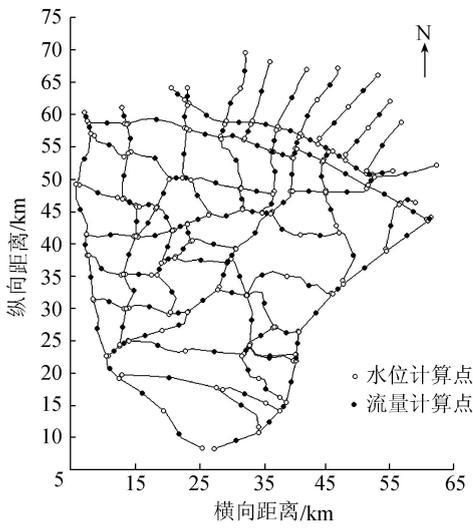


图2 望虞河西岸河网概化

面源则平均分配到各相应河段上。

## 2.2 模型率定验证

**a. 水量率定。**采用试错法进行率定,即根据部分断面实测的水位资料或流量资料,调试各河道的糙率,使得计算水位或流量过程与实测水位或流量相吻合,得出望虞河西岸地区河道糙率为 0.015 ~ 0.023。模型率定的主要依据是 2012 年 1 月与 2 月甘露站(望虞河)与无锡站(大运河)实测水位过程以及钓渚桥站的实测流量过程,望虞河水文站点位置见图 3,水位、流量率定结果见图 4。

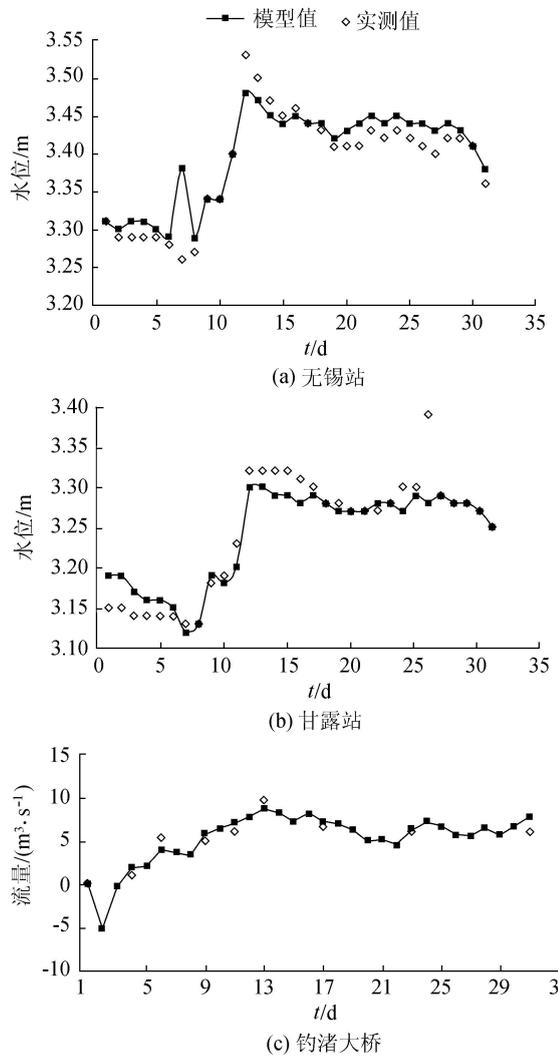


图4 水位及流量率定结果

表1 2012年资料率定的相对误差统计 %

水质指标	$E_{<20\%}$	$E_{<30\%}$
COD	29.73	57.69
$\text{NH}_3\text{-N}$	22.43	51.58
TP	30.41	59.45

率定误差小于 20%、30% 者所占百分比<sup>[9]</sup>)。由表 1 可见,水质实测值及模型计算值吻合较好,说明该模型可用于模拟望虞河西岸河网区的水质变化过程。

## 2.3 总量控制计算

**a. 计算条件。**根据建立的望虞河西岸水动力模型进行不同设计水文条件下水动力计算,提取流量流速计算结果;根据已建立的水质模型计算各功能区段上的污染物入河量;污染物综合衰减系数基于已率定的望虞河西岸水质模型综合衰减系数来定;边界水质采用模型边界的水功能区水质;西岸四条主要支流与望虞河相交断面的计算水质目标取Ⅲ类水。

**b. 计算结果。**将入河污染物总量分配到西岸各个区域,并根据区域的污染物削减潜力,分析得到各个区域内近期污染物削减目标可达性情况。从图



图3 望虞河水文站点位置

**b. 水质率定。**水质模型采用 2012 年该区域的实测水质浓度资料进行验证,率定得到的 COD 降解系数为  $0.08 \sim 0.10 \text{ d}^{-1}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  降解系数为  $0.08 \sim 0.15 \text{ d}^{-1}$ , TP 降解系数为  $0.07 \sim 0.18 \text{ d}^{-1}$ 。率定和验证相对误差情况的统计见表 1 ( $E_{<20\%}$ 、 $E_{<30\%}$  分别为

5 可见,近期各项削减潜力实施后,大部分地区的污染物排放量,尤其是  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP,仍然无法达到污染物排放总量控制的目标。

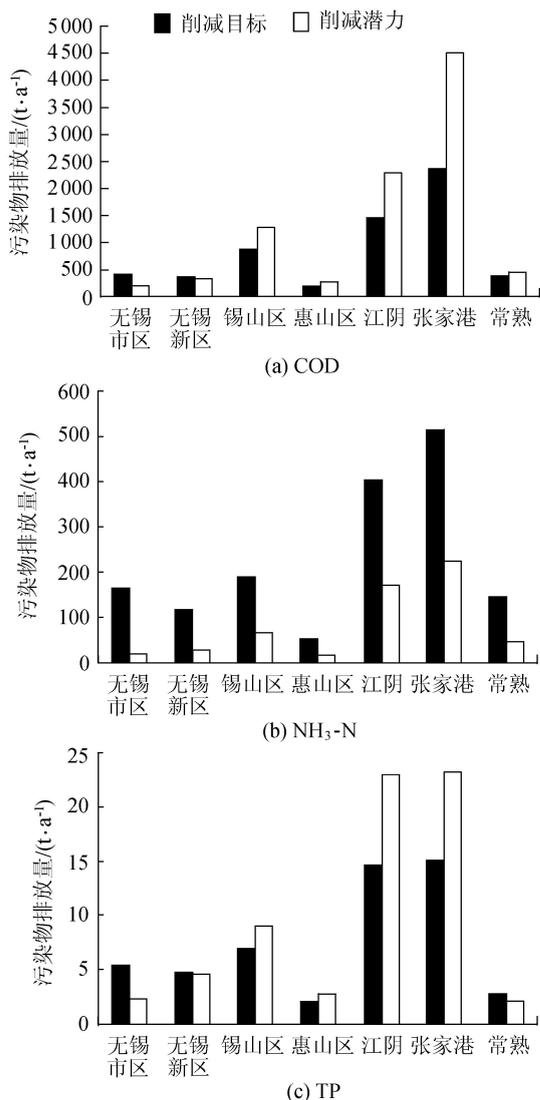


图5 研究区域内各污染物排放总量控制达标情况

### 3 引排条件分析

#### 3.1 引水顶托临界条件的确定

由于西岸支流水质差,污染物总量不达标,且西岸水流的自然流向是自西向东。望虞河引水时沿程会汇入西岸支流的污水,并对望虞河水质产生较大影响,进而影响到望虞河入太湖水质。因此为使望虞河成为优质长江水引入太湖的“清水通道”,同时满足西岸地区的日常排水需要,必须要综合考虑西岸排水与望虞河引水的关系,在阻止西岸支流污水汇入望虞河的同时又不能使西岸污水长期滞留在西岸地区。

本文选取钓渚桥流量站、西岸的陈墅、无锡、北国三个水位站,望虞河干流上的甘露水位站来分析西岸水位站与望虞河水位站水位差值和西岸支流入望虞河流量之间的响应关系,其中以钓渚桥的流

量来代表西岸支流入望虞河流量。2009年望虞河西岸4个主要水位站的全年水位值以及钓渚桥流量站的全年流量值见图6、图7。

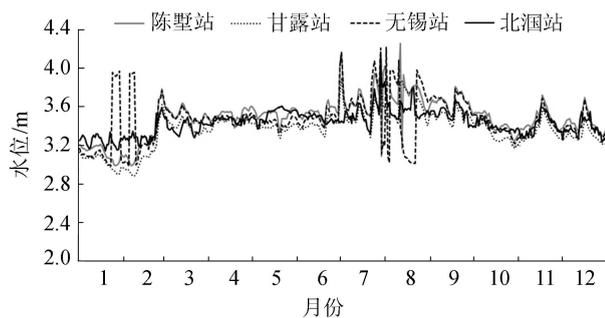


图6 四个主要水位站全年水位实测过程线

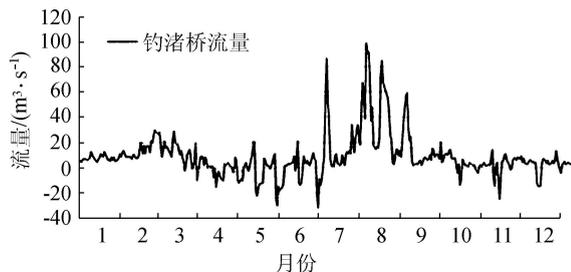


图7 2009年钓渚桥站全年流量实测过程线

当望虞河水位高于西岸水位值时能够顶托住西岸来水。当望虞河水位低于西岸水位站水位时,需要控制两者的水位差才能保证望虞河引水能够顶托住西岸的来水。通过水位、流量数据分析(图8~9),当陈墅站与甘露站的水位差小于0.18 m,无锡站与甘露站水位差小于0.12 m,北涸站与甘露站水位差小于0.09 m时,望虞河西岸支流的水流由东向西流动,即此时望虞河引水能产生顶托。

#### 3.2 计算方案

望虞河的引水水位抬高可以顶托住西岸的来水,但是由于西岸每天都会产生一定量的污水,累积到一定的时间,望虞河引水将顶托不住西岸的来水,为了避免西岸污水过度雍高汇入望虞河,使望虞河水质变差,必须在望虞河引水到一定时间后,将西岸污水通过望虞河排水。从望虞河引水开始顶托西岸来水到望虞河引水顶托不住西岸来水的时间周期称为蓄积时间,这段时间内西岸污水不会进入到望虞河。

为了更好地模拟望虞河引调水期西岸水流流态,并计算出西岸排水与望虞河引水的时间关系,在西岸沿江闸门不同调度工况和望虞河不同引水水位工况的组合方案下进行计算,具体计算方案见表2,根据望虞河引水调度经验值,其中望虞河引水低水位取3.2 m,高水位取3.8 m。根据翟淑华<sup>[10]</sup>研究,同为望虞河常熟枢纽自引条件,东岸沿望虞河闸门适当开启后,望虞河东岸的分流会使其比东岸全封闭条件下日平均减少入太湖流量 12 m<sup>3</sup>/s,因此为保

表2 西岸沿江闸门不同工况下望虞河引水

顶托分析模型计算方案

西岸沿江闸门引排水状况	方案	望虞河引水水位
西岸沿江闸门关闭	方案1	低水位
	方案2	高水位
西岸沿江闸门引水	方案3	低水位
	方案4	高水位

证望虞河引长江水入太湖水量,本次调度工况只考虑东岸沿线闸门全部关闭的情况,东岸支流与望虞河干流无水量和污染物通量的交换。

### 3.3 计算结果

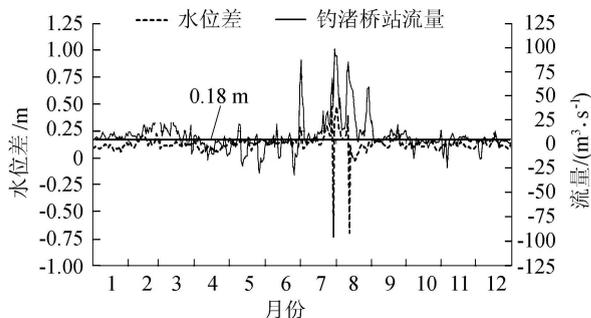
根据西岸支流上的水位站水位与望虞河水位站水位的差值控制条件,通过模型计算出不同方案下,望虞河引水顶托的水位控制值和蓄积时间。表3为提取的模型计算结果。

表3 不同方案下望虞河引水时顶托时间计算结果

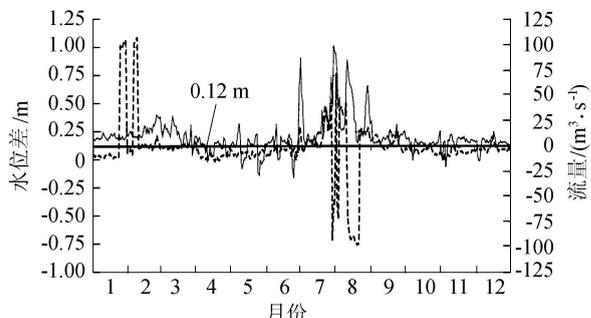
方案	蓄积时间/d	甘露站水位/m	无锡站水位/m	无锡站与甘露站水位差/m	陈墅站水位/m	陈墅站与甘露站水位差/m	北涇站水位/m	北涇站与甘露站水位差/m
方案1	5	3.04	3.11	0.07	3.05	0.01	3.03	-0.01
	10	3.14	3.19	0.05	3.22	0.08	3.20	0.06
	15	3.20	3.27	0.07	3.33	0.13	3.27	0.07
	19	3.21	3.31	0.10	3.39	0.18	3.30	0.09
	20	3.24	3.36	0.12	3.38	0.14	3.27	0.03
方案2	5	3.60	3.61	0.01	3.62	0.02	3.59	-0.01
	10	3.68	3.70	0.06	3.72	0.08	3.73	0.05
	15	3.71	3.79	0.08	3.78	0.07	3.77	0.06
	20	3.76	3.85	0.09	3.86	0.10	3.84	0.08
	24	3.77	3.89	0.12	3.92	0.15	3.86	0.09
方案3	5	3.20	3.25	0.05	3.26	0.06	3.23	0.03
	10	3.25	3.37	0.12	3.38	0.13	3.34	0.09
	13	3.26	3.36	0.10	3.44	0.18	3.31	0.05
	15	3.27	3.35	0.08	3.40	0.13	3.30	0.03
	20	3.30	3.34	0.04	3.38	0.08	3.31	0.01
方案4	5	3.63	3.65	0.02	3.69	0.06	3.65	0.02
	10	3.66	3.72	0.06	3.81	0.15	3.73	0.07
	15	3.73	3.85	0.12	3.88	0.15	3.79	0.06
	16	3.73	3.81	0.08	3.9	0.17	3.82	0.09
	17	3.75	3.83	0.08	3.93	0.18	3.81	0.06
	20	3.76	3.8	0.04	3.87	0.11	3.79	0.03
	25	3.78	3.8	0.02	3.84	0.06	3.75	-0.03

a. 水位控制条件计算结果。根据上文提取的模型计算结果可以得到不同计算方案下,望虞河引水顶托时,西岸支流上的水位站与望虞河上水位站之间的水位差值控制条件(表4)。

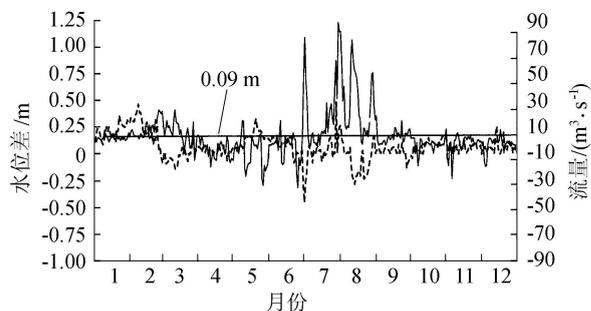
b. 望虞河引水与西岸地区排水之间的关系(蓄积时间计算)。根据上文提取的模型计算结果可以得到不同计算方案下,西岸排水与望虞河引水的时间关系,即望虞河引水顶托时,西岸污水的蓄积时间。



(a)陈墅站、甘露站

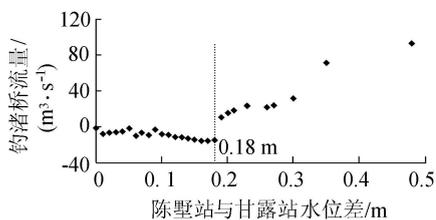


(b)无锡站、甘露站

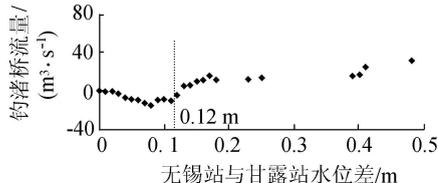


(c)北涇站、甘露站

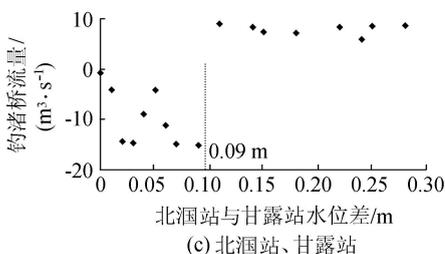
图8 2009年各站与甘露站的水位差与钓渚桥站流量实测关系曲线



(a)陈墅站、甘露站



(b)无锡站、甘露站



(c)北涇站、甘露站

图9 2009年各站与甘露站水位差和钓渚桥站流量响应关系

表4 望虞河引水顶托时西岸各水位站与望虞河

(甘露站)控制运行水位差 m

西岸沿江 闸门引排 水状况	方案	望虞河引 水水位控 制水位差	无锡站与 甘露站控 制水位差	陈墅站与 甘露站控 制水位差	北 涧站与 甘露站控 制水位差
西岸沿江 闸门关闭	方案 1	低水位	0.10	0.18	0.09
	方案 2	高水位	0.12	0.15	0.09
西岸沿江 闸门引水	方案 3	低水位	0.12	0.13	0.09
	方案 4	高水位	0.12	0.15	0.06

注:引水:当水位差值低于控制水位差时,望虞河引水,此时望亭枢纽关闭,常熟枢纽均开启;排水:当水位差高于控制水位差时,西岸排水,此时望亭枢纽关闭,常熟枢纽开启。

由表5可知,在方案1下望虞河从长江连续引水19d后需要对西岸进行一次排水;在方案2下望虞河从长江连续引水24d后需要对西岸进行一次排水;在方案3下望虞河从长江连续引水10d后需要对西岸进行一次排水;在方案4下望虞河从长江连续引水15d后需要对西岸进行一次排水。

表5 不同调度方案下望虞河引水与西岸排水的时间关系

西岸沿江 闸门引排水状况	方案	望虞河 引水水位	望虞河 引水周期/d
西岸沿江闸门关闭	方案1	低水位	19
	方案2	高水位	24
西岸沿江闸门引水	方案3	低水位	10
	方案4	高水位	15

## 4 结 语

在望虞河西岸污染物入河总量控制不达标的情况下,从控制西岸污水入望虞河的角度出发,提出了望虞河引水顶托的概念,并利用MIKE11一维水动力模型计算出不同引调方案下,望虞河引水顶托的水位控制条件和望虞河引水顶托的时间控制条件,以此实现短期内望虞河引长江水入太湖的水质能够达标。

从长远角度来看,为保证望虞河引江入湖水水质不受望虞河西岸污染源的影响,一方面应该从源头出发加大环境污染整治力度,严格控制西岸污染物入河总量,另一方面应该进一步提高流域水资源调控能力,加快流域其他能够提高流域纳污能力的引排工程的投入运行,例如:走马塘延伸拓浚工程、新沟河延伸拓浚工程、望虞河西岸控制工程、新建截污管道工程等实现清污分流,减轻望虞河纳污负担,使“引江济太”能够引排分开,最终保障望虞河引江济太的水质安全。

## 参考文献:

[1] 翟淑华,郭孟朴.望虞河引水对太湖影响前景分析[J].水资源保护,1996(4):12-15.(ZHAI Shuhua, GUO Mengpu. Prospect analysis of Wangyu River diversion effects on Taihu [J]. Water Resources Protection, 1996(4):12-15. (in Chinese))

[2] 张良平,王珏,徐骏.调水改善武澄锡虞区河网水质效果评估[J].人民长江,2009,40(7):30-32.(ZHANG Liangping, WANG Jue, XU Jun. Water transfer to improve river water quality effect assessment in Wu Cheng Xi Yu Area [J]. Yangtze River, 2009, 40(7): 30-32. (in Chinese))

[3] 王水,胡开明,周家艳.望虞河引清调水改善太湖水环境定量分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(7):1035-1040.(WANG Shui, HU Kaiming, ZHOU Jiayan. Quantitative analysis on water environment improvement by clean water diversion from Wangyu River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(7): 1035-1040. (in Chinese))

[4] 马倩,田威,吴朝明,等.望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析[J].湖泊科学,2014,26(2):207-212.(MA Qian, TIAN Wei, WU Chaoming, et al. Total phosphorus and total nitrogen concentrations of the water diverted from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(2):207-212. (in Chinese))

[5] 王领元.应用MIKE对河流一、二维的数值模拟[D].大连:大连理工大学,2007.

[6] 李梓嘉,董增川,樊孔明,等.MIKE11模型在泗洪县城区河网引水冲污工程中的应用[J].水电能源科学,2012,30(8):100-103.(LI Zijia, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of MIKE11 model in water diversion and flushing pollutants of urban river network in Sihong City [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8):100-103. (in Chinese))

[7] 杨洵,梁国华,周惠成.基于MIKE11的太子河观-菱河段水文水动力模型研究[J].水电能源科学,2010,28(11):84-87,171.(YANG Xun, LIANG Guohua, ZHOU Huicheng. Study on hydrology and hydrodynamic model in Guanying-Shenwo Section of Taizihe River based on MIKE11 [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(11): 84-87, 171. (in Chinese))

[8] 马强,陈福容,王颖.基于MIKE11 Ecolab模型的梁滩河流域水污染问题探讨[J].水电能源科学,2011,29(11):33-36.(MA Qiang, CHEN Furong, WANG Yin. Research on water pollution problem of Liangtanhe basin based on MIKE 11 Ecolab model [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11):33-36. (in Chinese))

[9] 陈亚男,逢勇,赵伟,等.望虞河西岸主要入河支流污染物通量研究[J].水资源保护,2011,27(2):26-28.(CHEN Yanan, PANG Yong, ZHAO Wei, et al. Study on flux of pollutants discharged into western Wangyu River Basin through main inflow river channels [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2):26-28. (in Chinese))

[10] 翟淑华.河网水质管理决策支持系统在引江济太中的应用[J].湖泊科学,2002,14(4):317-321.(ZHAI Shuhua. Application of Taihu Basin water quality mangement decision support system [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(4):317-321. (in Chinese))

(收稿日期:2015-05-20 编辑:徐 娟)