

# 基于Delft3D模拟的城市黑臭水体治理方案评估

柯庆, 王林森, 陶涛

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 随着工农业发展和城市化进程加速,城市水环境质量急剧下降,黑臭水体问题极为严重,已严重制约居民的生活。根据东营L河段的水流特性、水文、污染源的调查资料及水质实测资料,利用Delft3D软件进行模拟,得到水质时空分布,结合水体流动不畅的特征,提出在河段适当位置添加人工湿地,通过人工湿地生态修复黑臭水体,取得了较好的效果。

**关键词:** 黑臭水体; 人工湿地; Delft3D模型

中图分类号: TU992

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.014

柯庆,王林森,陶涛. 基于Delft3D模拟的城市黑臭水体治理方案评估[J]. 灌溉排水学报,2017,36(1):79-84.

## 0 引言

城市黑臭水体是指城市建成区内,呈现令人不悦的颜色和(或)散发令人不适气味的水体的统称。黑臭水体主要是过量纳污导致水体供氧和耗氧量失衡的结果,水体缺氧乃至厌氧条件下污染物转化并产生氨氮、硫化氢、挥发性有机酸等恶臭物质以及铁、锰、硫化物等黑色物质<sup>[1]</sup>。随着工业化和城镇化进程加速,东营市工业企业和城市人口急剧增加,基本呈现工业围城的格局,大量的生产生活废水排入水体之中,根据官方公布的数字,在其L河流域,污水排放口竟然多达231个,工业企业298家<sup>[2]</sup>,远远超出了其本身的自净能力,致使河道水质污染日趋严重,黑臭水体问题也已严重制约了地区的社会经济发展,严重威胁到城市居民的饮水安全和人民群众的健康,国家也将城市黑臭水体治理作为近几年环境治理的重要内容。因此,对该河流域进行科学合理、经济有效的水质评价、预测和治理刻不容缓,国务院颁布的《水污染防治行动计划》提出“到2020年,地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在10%以内,到2030年,城市建成区黑臭水体总体得到消除”的控制性目标<sup>[3]</sup>。但目前,还没有建立起该流域水质模拟模型,无法建立污染物排放与水质的响应关系,对流域水质防控造成了极大的困难。因此,急需建立水体水质模拟与预报模型,对流域进行合理、有效的水污染治理。

水质模型是水质模拟的基础,是描述水体中物质随时间和空间迁移转化规律的数学模型的总称<sup>[4]</sup>。国内外对水质模拟模型的研究已较为成熟,主要包括一维水质模型(例如EPANET中供水管网水质模型)、二维水质模型(水深较浅、面积较大的水库湖泊等)和三维水质模型等领域。目前,应用较多的水质数值模拟软件有美国ANSYS公司的ANSYS软件、丹麦水力研究院的MIKE11、美国环保局的WASP<sup>[5]</sup>、美国奔特力的WaterGEMS、荷兰代夫特水力研究院开发的Delft3D等。为此,根据L河的水流特性、水文、污染源的调查资料及水质实测资料,应用Delft3D软件模型建立L河MHZQ段水质模拟模型,对该段2015年的水质情况进行模拟,分析主要污染物(氨氮、COD、Cu)的时空分布和变化特征,并提出利用人工湿地的生态修复能力治理黑臭水体,为该段水环境质量的改善及流域水生态保护提供理论依据,进一步可运用于L河其他区段以及东营市其他河流,具有重要的理论和现实意义。

收稿日期:2016-06-13

基金项目:公益性行业科研项目(201306102)

作者简介:柯庆,男,陕西商洛人。研究生,主要从事水资源规划技术经济研究。E-mail: keqing0319@sina.com

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

东营市地处黄河入海口的三角洲地带,地势沿黄河走向自西南向东北倾斜。西南部最高高程为28 m(大沽高程,下同),东北部最低高程1 m,自然比降为1/8 000~1/12 000,属暖温带大陆性季风气候,年平均降水量为555.9 mm,多集中在夏季,占全年降水量的65%,降水量年际变化大,易形成旱、涝灾害。L河比降为1/6 000~1/8 000,流量为3.0~85.0 m<sup>3</sup>/s。近年来,L河水环境问题突出,由于河上水闸众多,水流不畅,水体发黑发臭,严重影响居民正常的生产生活。本研究着眼于L河下游河段水质模拟与治理,如图1所示,通过数值模拟获得水质的时空分布及变化特征,并提出相应的治理方法。

## 1.2 Delft3D模型

Delft3D是由荷兰代夫特水力研究院开发的一套功能强大的软件包,主要应用于自由地表水环境。该软件具有灵活的框架,能够模拟二维和三维的水流、波浪、水质、生态、泥沙输移及床底地貌,以及各个过程之间的相互作用,是目前国际上最为先进的水动力-水质模型之一<sup>[6]</sup>。

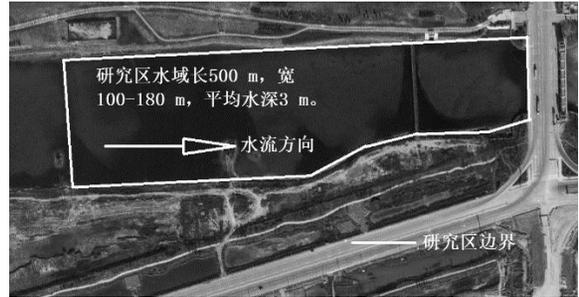


图1 研究区概况图

### 1.2.1 Delft3D水动力(FLOW)模型原理

FLOW模块是一个可以计算非恒定流的多维(二维或三维)水动力学和物质输运模拟程序,以Navier-Stokes方程<sup>[7]</sup>为基础,根据浅水方程和Boussinesq假设,不考虑地球自转引起的柯氏力效应,得到的河流不可压缩水体的三维运动基本控制方程,见式(1)一式(4):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g, \quad (4)$$

式中: $u, v, w$ 分别为水体在 $x, y, z$ 方向的分速度(m/s); $P$ 为压强(Pa); $\rho$ 为水体密度(kg/m<sup>3</sup>); $g$ 为重力加速度(m/s<sup>2</sup>); $\tau_{ij}$ 为剪应力(N); $i$ 为剪应力所在的面; $j$ 为应力的方向。

采用反向差分方法(ADI)求解上式,在对微分方程进行差分离散时,时间离散过程中将任一时间步长分成前后2个半步长,在前半个时间步长若取某一个方向为隐式,则在后半个时间步长该方向为显式。

### 1.2.2 Delft3D水质(D-Water Quality)模型原理

Delft3D-Water Quality水质模块是一个多维水质模型,能够模拟水质变化的物理、化学、生物等多种反应过程、污染物在固(底泥)-液(水体)-气(大气)三态之间的交换以及各种污染物之间的物理化学生物反应迁移转化<sup>[8]</sup>,其污染物迁移转化方程如式(5)所示,即:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\vec{u} \cdot \vec{\nabla} C + \vec{\nabla} \cdot (\vec{D} \cdot \vec{\nabla} C) + S + f_R(c, t), \quad (5)$$

式中: $\vec{u}$ 为水流速度(m/s), $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ ;  $\vec{\nabla} C$ 为污染物质量浓度梯度(mg/(L·m)), $\vec{\nabla} C = \left( \frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}, \frac{\partial C}{\partial z} \right)$ ;  $S$ 为源

漏项; $\vec{D}$ 为扩散张量, $\vec{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{pmatrix}$ ;  $f_R(c, t)$ 为生物、微生物、化学、生态等反应。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区治理前水质模拟与分析

通过对研究区网格划分、定义河底地形、设定边界条件进行水力模拟,之后将水力模型与水质模型耦

合,设定水质模拟的边界条件后进行水质模拟,最终得到L河MHZQ段水动力-水质数据。

### 2.1.1 水动力模拟

1)网格设置。数值模拟范围如图1所示,长500 m,河面宽度在100~180 m之间,平均水深3 m。采用正交曲线网格对建模区域进行网格剖分,垂直方向上分为5层,共计 $164 \times 66 \times 5$ 个网格单元。与一般的矩形网格相比,曲线网格正交性很好,有利于计算,而且可以更好地与边界拟合贴近,从而可以较好地模拟边界对流场的影响以及边界的流态。图2为模型的局部网格布置图。根据已有的水深样本文件可以在quicken菜单下编辑或生成网格节点上的水深,然后利用三角插值(Triangular interpolation)得到所有网格节点的水深,生成水深文件(图3)。

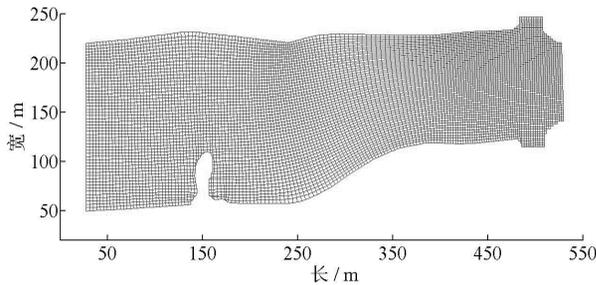


图2 研究区网格划分

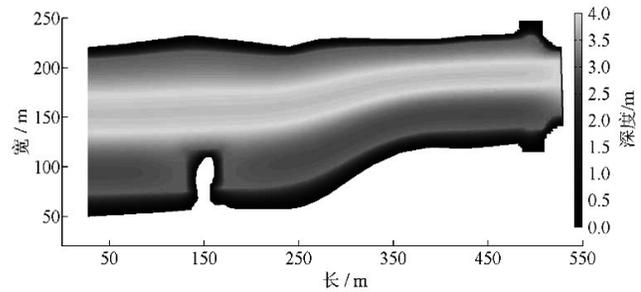


图3 研究区地形文件

2)河道水动力模型率定。采用河道夏季的正常水位-0.485 m(以闸门顶部向下1 m处为0水位,向上为正、向下为负)作为初始条件。河道底部粗糙系数采用曼宁系数 $n$ ,取 $n=0.03$ ;水平涡动黏性系数 $V_h$ ,取 $V_h=10 \text{ m}^2/\text{s}$ ;时间步长取6 s。采用8月研究区水位资料,将入口处水位作为给定水位边界处理,该研究区出水处被闸封死,故无出水开边界。

通过模拟,得到了研究区流场的时空变化情况,由于该研究区为下封闭区域,仅上游为开边界,且上游开边界水位变化较小,故区内水体流动极小,平均流速小于 $0.005 \text{ m/s}$ ,实测8月某时刻河道某一点水体流速为 $0.003 \text{ m/s}$ ,模拟得该时刻该点处流速为 $0.0032 \text{ m/s}$ ,误差较小,准确度较高,该模型可以有效地模拟L河段在不同条件下的水动力特征。

### 2.1.2 水质模拟

水体黑臭在夏季高温季节尤为明显,当地8月平均气温最高,水体黑臭现象最为显著,根据现有资料模拟时间确定为:2015年8月1—31日,时间步长确定为6 s。研究区基本呈静态水体,容易发生富营养化,考虑到水体黑臭现象是由于外源有机物及氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )消耗水体中氧气、内源底泥释放污染物和水体流动性差及水温升高,选取COD为水质综合指标、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为富营养化指标和Cu作为重金属指标。上游断面质量浓度作为入流开边界来处理,下游为封闭闸门,氨氮降解系数取 $0.1 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,COD降解系数取 $0.1 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,水平扩散系数为 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ,垂直扩散系数为 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

经过模拟,COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度随时间微小波动上升,而Cu的质量浓度略微下降,在模拟时间段内污染物质量浓度变化很小,不超过3%,其中COD质量浓度在 $60 \text{ mg/L}$ 附近波动, $\text{NH}_3\text{-N}$ 维持在 $5 \text{ mg/L}$ 左右,Cu质量浓度在 $2 \text{ mg/L}$ 左右,且在研究区内污染物分布均匀。

## 2.2 研究区人工湿地治理方案模拟

人工湿地系统,是通过人为的控制,利用湿地复杂的特殊物理、化学和生物综合功能净化污水,且以污水净化为主要目的<sup>[9]</sup>。针对L河段河道水体黑臭问题,拟采用在河道南岸增设人工湿地,依靠人工湿地的生物净化作用,对污染物进行净化,从而降低河道COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及Cu质量浓度;同时,由于人工湿地从河道取水并将净化后的水排入河道,会使得河道水体流速增大,进一步充分利用水体本身的自净能力,从而达到对该黑臭水体治理的目的。人工湿地的出水COD质量浓度为 $40 \text{ mg/L}$ , $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 $2 \text{ mg/L}$ ,Cu质量浓度为 $1 \text{ mg/L}$ ,考虑到该河段上游水质较好,近坝址处水质较差,同时人工湿地处理量较小,出水口不会对河道流场造成大的影响,且人工湿地的布局受到土地利用类型限制,故布局如图4所示。此时,水力负荷为 $0.214 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,有机( $\text{BOD}_5$ )负荷率为 $3.43 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ,水力停留时间2 d,各项指标均符合《人工湿地污水处理工程规范》。

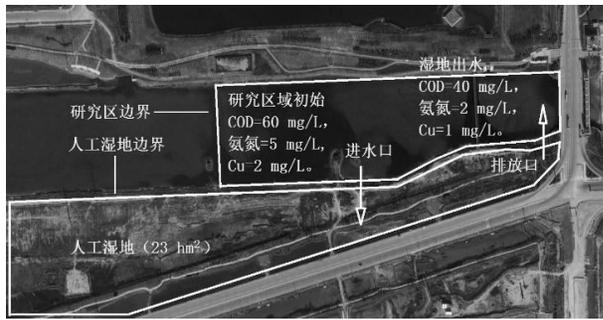


图4 湿地布局

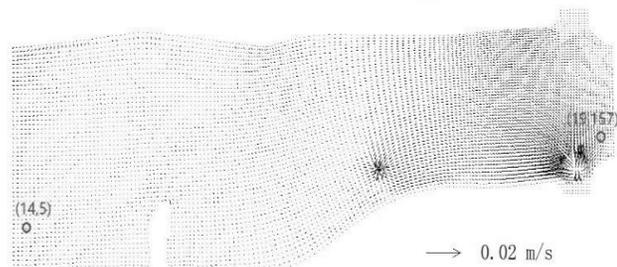


图5 流场分布

通过Delft3D软件对添加人工湿地后的河道模拟,可以获得该研究区的流场矢量分布(图5)及3 d后污染物质量浓度分布(图6(a)、(b)、(c)),可见该研究区平均流速较低,在人工湿地的取水口和排放口处流速较高,人工湿地的进出水对上游边界处的流场影响较小,上游边界处流速接近0;各污染物在人工湿地排放口处的质量浓度最低,往上游逐渐增高。

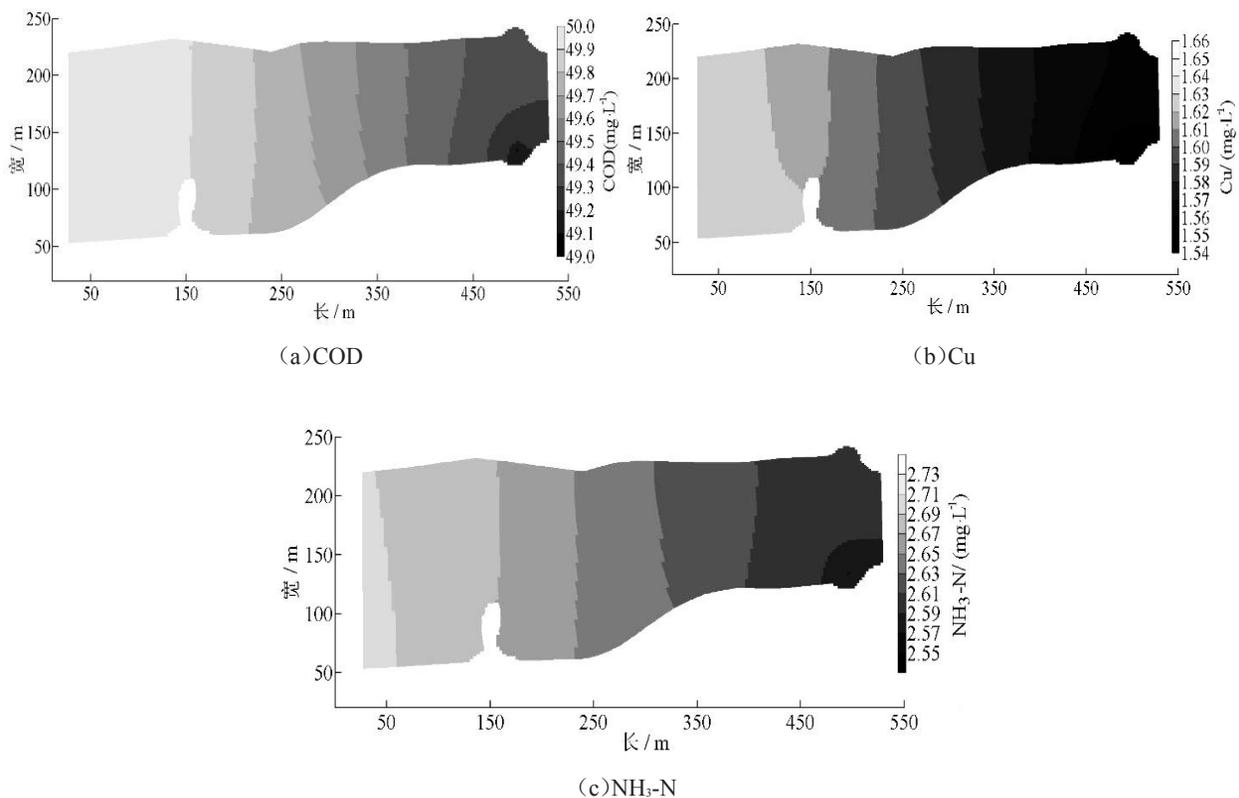


图6 各污染物质量浓度分布

研究区监测点(19,157)位于坝址处,(14,5)位于研究区上边界处(图5),各污染物变化曲线见图7(a)、(b)、(c)、(d),经过15 d左右,大部分范围内主要污染物质量浓度有明显下降,COD去除率约为33.3%,氨氮去除率约为60%,Cu去除率约为50%,模拟结果与其他研究<sup>[10]</sup>相近,模拟结果可靠;COD和氨氮质量浓度较人工湿地出水稍低,是因为人工湿地的存在加速了水体流动性,水体的自净能力得到增强,使得COD和氨氮在河道内继续降解,从而质量浓度低于人工湿地出水。而Cu质量浓度随着时间的推移逐渐趋于1 mg/L,而不会继续下降,说明该水体在自净能力下无法进一步对Cu进行降解。最终各污染物指标达到地表水V类水标准。根据人工湿地的处理能力,可将人工湿地的工作模式设置为当测得河道水质较差(COD达到60 mg/L以上或氨氮达到5 mg/L或Cu达到2 mg/L)时开启人工湿地对河道水质进行净化,运行15 d河道水质达标,通过降低流量至能维持人工湿地的正常生长即可,这样可达到短期内使河道水质达标并节省能耗的目的。

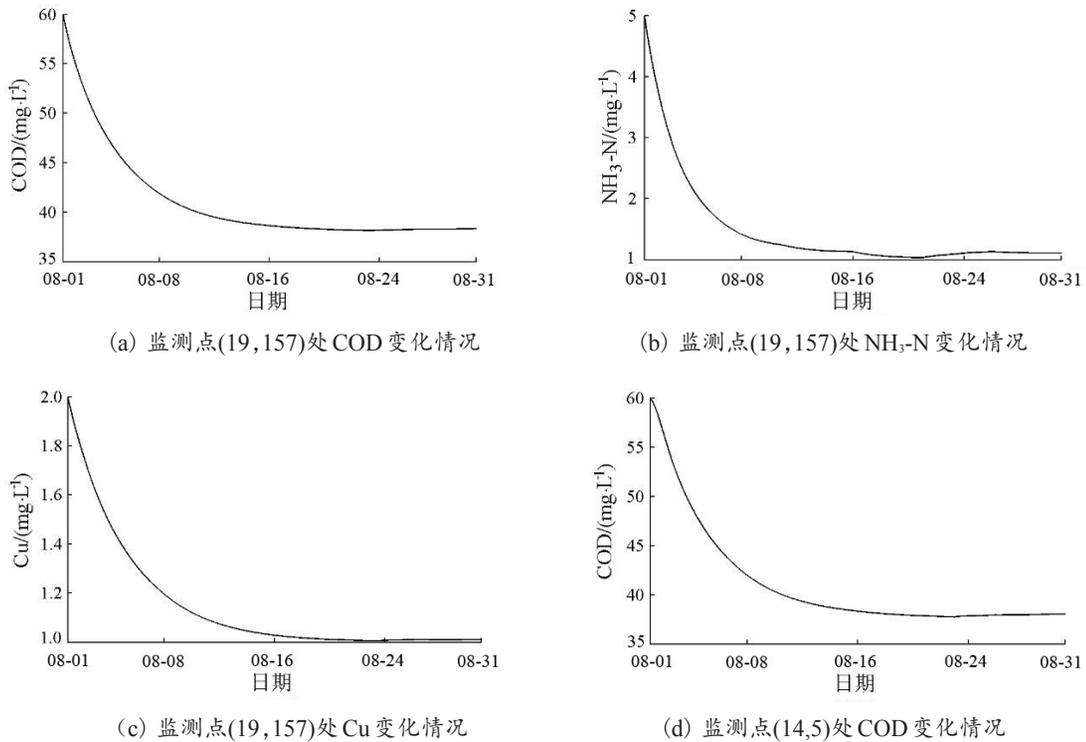


图7 监测点污染物质量浓度变化过程

水质数值模拟表明,在水流缓慢的河道上,利用人工湿地的净化作用能很好地处理黑臭水体问题,同时,人工湿地处理成本低,兼顾城市绿化作用,还能够改善局部空气质量及城市热岛效应,因此,对于用地不紧张的地区可采用此方法。城市黑臭水体的治理是一个投资较大的系统性工程,通过水质模拟,可以得到理论水质变化情况过程,从而更加精确地指导设计治理方案,并对现状进行科学合理优化,能减少因不了解水质变化过程而造成的治理方案投资过大或重复投资现象,为黑臭水体治理的经济化提供依据。

### 3 结论

1)在未添加人工湿地时,应用Delft3D软件对L河段进行水动力-水质模拟,用2015年8月实测结果验证,表明水动力和水质模型的模拟值和实测值误差较小,相关性很好,Delft3D软件在河道水动力-水质模拟方面具有很好的实用性。未进行治理时,各污染物质量浓度变化较小,这是由于该研究区水体流动缓慢,不利于污染物的迁移转化,且污染物质量浓度与水位负相关。

2)在河道南岸增设人工湿地,可以充分利用人工湿地的生态净化作用对河道水体中污染物进行处理,从而直接改善河道污染问题,根据水力水质模拟结果,当测得河道水质较差(COD达到60 mg/L以上或氨氮达到5 mg/L或Cu达到2 mg/L)时,开启人工湿地对河道水质进行净化,运行15 d后河道水质达标,通过降低流量至能维持人工湿地的正常生长即可,可以在较短时间内使河道水质达标并节省能耗。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,城市黑臭水体整治工作指南[Z]. 2015-08-28.
- [ 2 ] 东营市环境保护局,东营市中心城环境污染情况调查报告[Z]. 2008-03.
- [ 3 ] 中华人民共和国国务院,水污染防治行动计划[Z]. 2015-04-02.
- [ 4 ] 傅国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算[M]. 北京:中国环境科学出版社,1987.
- [ 5 ] 姜雪,卢文喜,张蕾,等. 基于WASP模型的东辽河水水质模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(12), 26-30.
- [ 6 ] 王炜. 二维洪水数值模拟在太浦河洪水风险图编制中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [ 7 ] 闻德荪. 工程流体力学(水力学)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 178-186.
- [ 8 ] Water quality and aquatic ecology modelling suite - D-Water Quality User Manual[Z]. Deltares, Delft, Netherland, 2014.
- [ 9 ] 范瑾初,金兆丰. 水质工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 485-491.
- [ 10 ] 牟军,崔远来,赵树君,等. 塘堰湿地对农田排水氮磷净化效果的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2015, 34(8):27-31.

# Assessment of Malodorous Black Water Treatment Based on Delft3D Simulation

KE Qing, WANG Linsen, TAO Tao

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With the industrial and agricultural development and the rapid urbanization, urban water environment was severely contaminated in recent years, as a result, malodorous black water problem appeared, which affected industry agriculture and residents' life in turn. The time-space distribution of water quality situation was obtained by computer simulation of Delft3D software based on survey data of flow characteristics, hydrological and water pollution sources, and measured data of water quality of L river. Combining the feature of low velocity of water flow, a new method, by adding artificial wetland in certain location as its eco-restoration effect, was proposed to treat malodorous black water problem in Dongying city, and shows good results.

**Key words:** malodorous black water; artificial wetland; Delft3D model

责任编辑:白芳芳

---

(上接第 56 页)

# Water Requirement and Irrigation Schedule of Winter Wheat and Summer Maize in Jinghuiqu Irrigation District

SONG Tong, CAI Huanjie, XU Jiatao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to seek efficient water-saving irrigation mode under continuous wheat-maize cropping system, field plot trials during continuous cropping patterns were used, by reducing irrigation frequency, the average yield under traditional irrigation system was subjected to comparative. The results indicated that approximate water requirement of winter wheat and summer maize in Jinghuiqu was 410 mm and 400 mm. When the rainfall was 490 mm, planting economic irrigation quota was 305 mm in the whole year, and irrigation volume could be reduced by 8.9%. Under the continuous wheat-maize cropping system, the whole crop yield was 12 010 kg/hm<sup>2</sup>, increased by 6.2% compared with monoculture. By reducing irrigation in wheat returning green stage and maize sowing stage, water use efficiency could be improved on the basis of yield, which was the better continuous irrigation mode.

**Key words:** winter wheat; summer maize; water requirement; yield; irrigation quota

责任编辑:陆红飞