

文章编号: 1006-4710(2015)01-0083-08

基于生态调水清渭河水环境效应研究

张航¹, 冯民权¹, 王莉^{2,1}, 聂文帅¹

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为研究生态调水对清渭河水水质变化的影响并评估生态调水效果, 建立适合清渭河的水动力水质模型。以 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3\text{ m}^3/\text{s}$ 不同工况模拟清渭河水动力水质变化规律并分析排污口附近流场和浓度场变化。在分别采取未截污和截污措施, 调水流量为 $3\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 各断面 COD 浓度和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别达到 V 类和 IV 类水质标准; 生态调水对排污口附近水质改善效果显著; 未考虑截污情况下一旦停止调水, 污水排入将直接威胁到清渭河水水质。通过研究, 论证本文理论与方法的可行性和有效性, 对该地区的水污染控制与水资源调控方略和可持续发展战略具有现实的指导意义和应用前景。

关键词: 生态调水; 水动力; 水质; 清渭河

中图分类号: TV8 **文献标志码:** A

Research on water environmental effects of Qingyi River based on ecological water diversion

ZHANG Hang¹, FENG Minquan¹, WANG Li^{2,1}, NIE Wenshuai¹

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in northwest arid area in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College Of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the influences of ecological water diversion upon the water quality change of the Qingyi River and to evaluate the effect of ecological water diversion. Hydrodynamic water quality changing laws of Qingyi River under different working conditions are simulated with $1\text{ m}^3/\text{s}$, $2\text{ m}^3/\text{s}$ and $3\text{ m}^3/\text{s}$ respectively and the impact on ecological water diversion to the flow and concentration field near the sewage outlet is analyzed. With the adaptation of non-intercepting and intercepting pollution measures, the COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations at each section reach grade V and grade IV when water diversion flow is $3\text{ m}^3/\text{s}$; Ecological water diversion has had an apparent effect upon water quality improvement near the sewage discharge outlet; Without considering the intercepting pollution conditions in stopping water diversion, sewage drainage will directly threats the water quality in Qingyi River. The feasibility and effectiveness of the theory and method in this paper through studies and tests are of the realistic guiding significance and application future for water pollution control and the planning of water resources regulation and control as well as sustainable development strategy in the region.

Key words: ecological water diversion; hydrodynamic model; water quality model; Qingyi River

近年来, 随着许昌市经济建设的高速发展和人口规模的不断扩大, 水污染物的排放量也在急剧地增加, 致使清渭河许昌段水质受到了严重污染, 河道生态严重破坏。许昌市也加大了对清渭河流域水污染治理力度, 采取了一系列措施已取得明显成效, 然而水质仍然无法满足流域水质目标考核及功能水体

水质要求。据统计, 80% 以上的城市河道受到污染, 其中许多甚至出现季节性和常年性水体黑臭现象^[1-5]。国内外学者在改善河网水环境质量时总结了大量经验, 一般包括四种治理措施, 底泥疏浚、河流形态整治、截污治污, 在有条件的地区, 采用水利工程引清水改善水环境也是一种见效快、效果明显

收稿日期: 2014-10-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2012ZX07204-004); 中央财政支持地方高校发展专项资金资助项目(106-00X101, 106-5X1205)。

作者简介: 张航, 男, 硕士生, 研究方向为水环境模拟与预测。E-mail: zhanghang816@163.com。

通讯作者: 冯民权, 男, 教授, 博导, 研究方向为水环境模拟与污染控制研究。E-mail: mqfeng@xaut.edu.cn。

的方法^[6-7]。Carles Iban 等^[8]研究跨流域调水对盐碱化、生物物种、河流挟沙能力等方面的影响,同时研究了调水期间河流环境流量和水质的变化。Ram B. Khadka 等^[9]介绍了尼泊尔 Melamchi 供水工程的情况,总结分析了该工程跨流域调水对下游水环境的影响。卢士强等^[10]利用 MIKE11 建立了上海市平原感潮河网的水动力和水质模型,同时数值模拟和分析了全市主要河流调水方案对水质的影响。石建军等^[11]以河流生态需水过程为生态控制目标,结合文峪河梯级水库的运行需求,建立梯级水库多目标调度模型,设置不同调度情景进行梯级水库模拟调度,得到不同情景下的梯级水库调度方案。张永永等^[12]结合引汉济渭工程,根据资源系统复杂性和水源配置原则,基于大系统分解协调理论建立了引汉济渭工程受水区水资源优化配置模型,得出引汉济渭工程是解决关中地区水资源短缺的重要保障。梁斌等^[13]运用河网一维水量水质模型分析计算“引江济太”工程各引水方案,并进行了引水效果预测评估。申海等^[14]提出了基于直觉模糊集的犹豫度加权组合方法,实验数据证明该组合模型通过调整确定性系数,可以对不同时期的水库洪水进行有效和合理的调度决策。王超等^[15]为改善张家港地区河网水环境,开展了引江调水的研究。以往的调度,主要考虑协调防洪与兴利的矛盾,发挥好防洪、灌溉、供水、发电、等方面的作用,而对其下游的河流生态保护与水环境改善考虑不多。许昌市每年利用颍汝干渠从北汝河向清漯河市段调水来改善清漯河水水质,然而,生态调水对清漯河市段产生的效果究竟如何,尚无相关文献对此做进一步的研究。本文通过对清漯河市许昌段生态调水方案的实例研究,建立二维水动力水质模型,以许昌市清漯河市调水工程为例,分析间断式调水对城市河流环境的改善作用。同时,丰富生态调水的研究内容和理论技术体系。

1 理论与方法

1.1 二维水动力基本方程

二维水动力基本方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}\xi + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \xi)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \xi)v] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gu \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \xi)c^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gv \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \xi)c^2} = 0 \quad (3)$$

式中: ξ 为自由水面水位(m); t 为时间(s); h 为水深(m); x 为横向空间坐标(m); y 为纵向空间坐标(m); u 、 v 分别为横向、纵向的速度分量(m/s); f 为柯氏系数; c 为谢才系数; g 为重力加速度(m/s²)。

1.2 二维水质基本方程

二维水质基本方程为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_{\text{横}} \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_{\text{纵}} \frac{\partial C}{\partial y}\right) - kCh + S_0 \quad (4)$$

式中: C 为污染物的质量浓度(mg/L); $D_{\text{横}}$ 、 $D_{\text{纵}}$ 为横向、纵向的混合系数;根据 Elder 经验公式计算 $D_{\text{横}} = 5.93 Hg^{0.5} u/c$, $D_{\text{纵}} = 5.93 Hg^{0.5} v/c$, H 为平均水深(m); S_0 为某种水质参数的源汇项;其余参数意义同上。

1.3 模型求解

连续方程 1 与动量方程 2、3 经有限差分分离离散化后,利用“分离步骤(Fractioned—Step)”配合“交替方向隐式法(ADI 法)”进行数值计算。计算输出结果包括每一计算时间点及网格点上的水深 h 、横向通量 p 和纵向通量 q 。根据这 3 个基本物理量及地形资料,可推导出每一计算时间点及网格上相应的河流水位变化、横向流速、纵向流速、合成流速及流向。将河流水位、流速代入水质方程(4)中,解出污染物浓度。假设流体不可压缩,同时忽略水深方向流速、流向的变化。

2 调水方案

2.1 水源

清漯河上可调水水源有两处,分别是佛尔岗水库和北汝河水库。佛尔岗水库位于长葛市双泊河上,现水面面积 5 000 亩,库容 1 600 万 m³。由于从佛尔岗水库到清漯河沿程会纳入十多个排污口,导致调入的水为 V 类水;北汝河橡胶坝位于襄城县十里铺乡鲍坡村附近,坝高 5 m,长 100 m(橡胶坝段),溢流段长 236 m,库容 680 万 m³,与下游大陈闸联合调度运行,通过颍汝干渠,向清漯河调水,调入的水为 III 类水。所以本文将北汝河作为调水水源。

2.2 调水路线

我国城市河流生态调水的基本出发点是,水是污染物的载体,在河流运动中,通过水流与空气交混吸收氧气,从而输运及降解污染物,这样,增加了河流水量,改善了河流水质,美化了河道景观。

本次调水工程的最终目的是通过调水,使清漯河近期水质达到 V 类水体功能要求。利用北汝河大陈闸蓄水,经颍汝干渠调水至石梁河,通过坡张闸

控制补给清漯河。调水路线详见图 1。

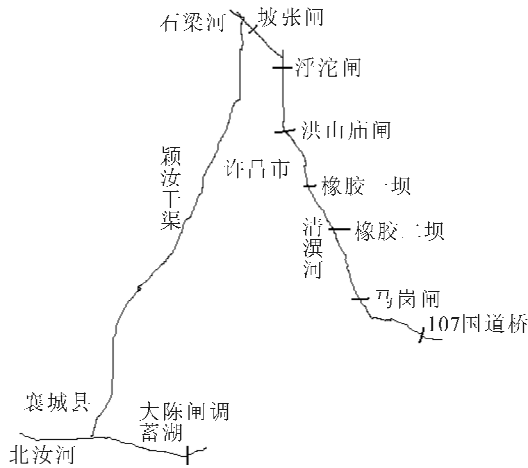


图 1 调水路线图
Fig. 1 Water transfer route

2.3 工况设计

从长远来看,河流治理的根本在于污染源的治理,为了模拟截污和未截污两种情景下生态调水效果,本文截取污和未截污两种情景,通过一周的间断调水方式,即调水两天,中间隔三天,再次调水两天,分别以 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 调水流量模拟清漯河水力水质变化规律。模拟指标为 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

3 模型应用

3.1 计算区域

根据清漯河复杂而不规则的地形特点,建立适合清漯河的水动力水质模型,计算区域的上游边界设在浮沱闸,下游边界设在 107 国道桥,共长 13.7 km。沿程地形图、河底高程图、浮沱闸断面图以及 107 国道桥断面图,如图 2~4 所示。

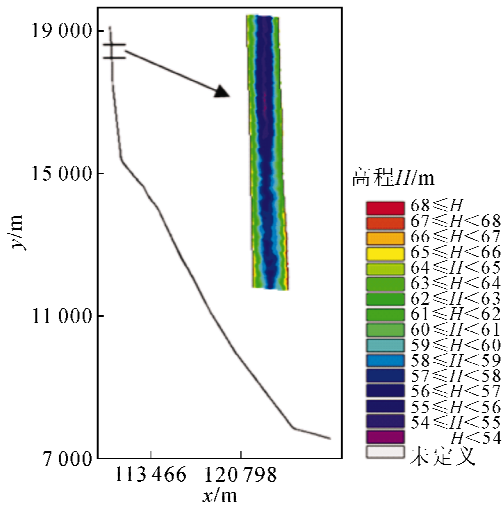


图 2 清漯河计算区域地形图

Fig. 2 Topography of the calculation area for Qingyi River

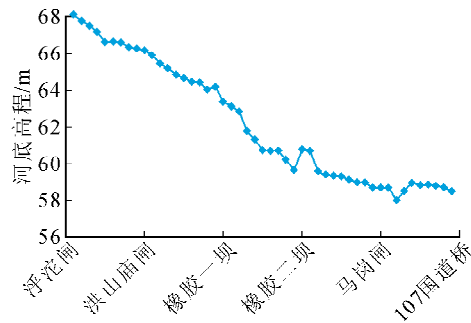


图 3 河底高程图

Fig. 3 River bottom elevation

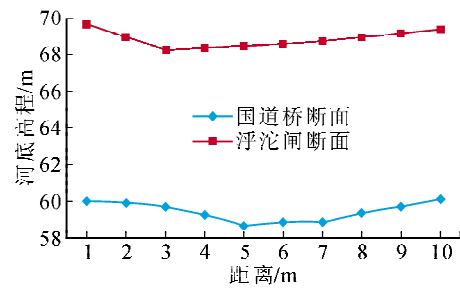
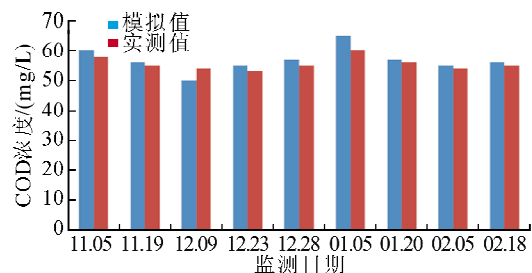


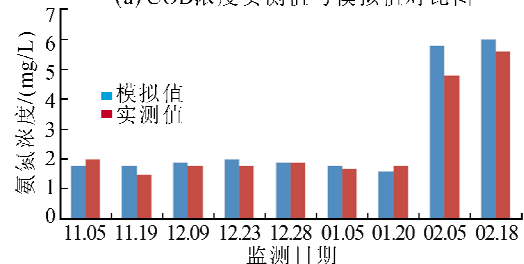
图 4 浮沱闸断面图和 107 国道桥断面图
Fig. 4 Sectional drawing for Hutuo gate and 107 national highway bridge

3.2 模型率定及验证

采用 2009 年的水位、流量及监测点污染物浓度,对水质模型进行率定及验证。经过率定,河流扩散系数为 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$,COD 降解系数为 $0.15/\text{d}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解系数为 $0.18/\text{d}$ 。采用 2010 年 11 月、12 月、1 月、2 月的水质数据作为上游边界的起始浓度,输入对应水质数据的水文参数,利用二维水质模型模拟下游边界浓度值,将模拟值与下游边界实测值进行比较,如图 5 所示。



(a) COD浓度实测值与模拟值对比图



(b) $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度实测值与模拟值对比图

图 5 清漯河 107 国道桥污染物实测值与模拟值对比图

Fig. 5 The contrast diagram of pollutants measured and simulated values for 107 national highway bridge

从图 5 可以看出,模拟值与实测值吻合较好,相对误差在±10%以内,基本能反映实测值的变化规律,因此模型模拟参数选取符合清渭河实际情况。

3.3 生态调水改善水质效果分析

考虑枯水期最不利情况,通过颍汝干渠从北汝河向清渭河市区段调水,在截污和未截污两种情景

下,采用一周的间断调水方式,即调水两天,中间隔三天,再次调水 2 天。调水流量分别为 1 m³/s、2 m³/s、3 m³/s。为了进一步研究生态调水对排污口附近水力水质影响,本文重点研究三达污水处理厂排污口附近流速和 COD 浓度变化。由于排污口 COD 浓度偏高,所以本文着重分析 COD 浓度变化规律,具体模拟结果见图 6~13。

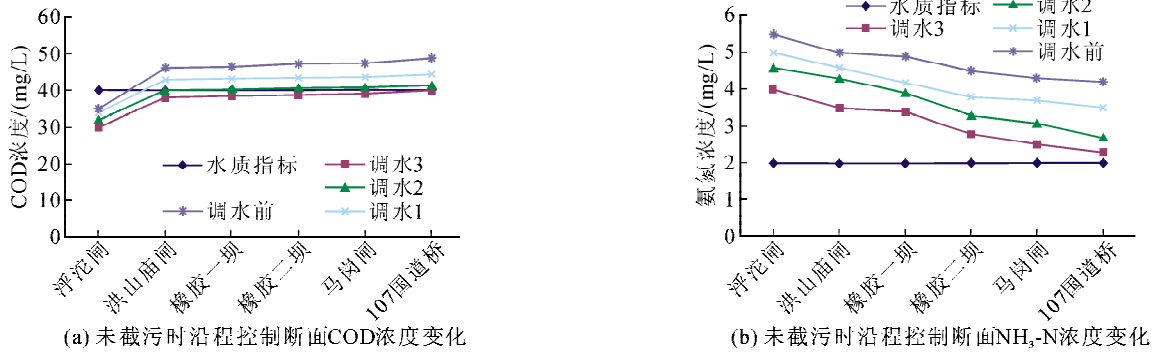


图 6 未截污时沿程控制断面污染物浓度变化

Fig. 6 The change of pollutant concentration of control section along the way in no sewage interception

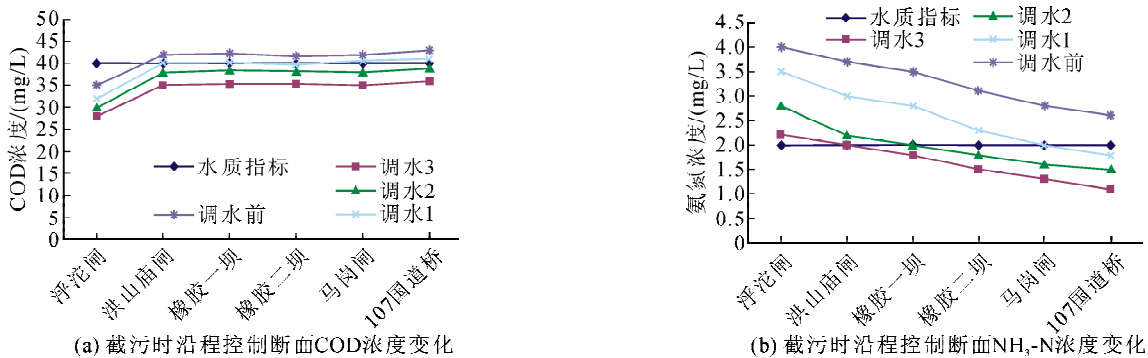


图 7 截污时沿程控制断面污染物浓度变化

Fig. 7 The change of pollutant concentration of control section along the way in sewage interception

由图 6~7 可以看出,生态调水使清渭河水质达到Ⅳ类水质标准。调水前,浮沱闸断面处 COD 浓度达到Ⅴ类水质标准,其余各断面 COD 浓度均高于Ⅴ类水质标准,各断面 NH₃-N 浓度均高于Ⅴ类水质标准。调水期间,调水流量为 2 m³/s 时,各断面 COD 浓度基本上达到Ⅴ类水质标准,但由于上游 NH₃-N 浓度过大,在引调 2 m³/s 水量时也并未达到Ⅴ类水质标准。调水流量为 3 m³/s 时,107 国道桥断面 NH₃-N 浓度基本达到Ⅴ类水质标准。采取截污措施后,调水流量为 1 m³/s 时,各断面 COD 浓度便基本上达到Ⅴ类水质标准,调水流量为 2 m³/s 时,大部分断面 NH₃-N 浓度到达Ⅴ类水质标准,调水流量为 3 m³/s 时,各断面 COD 浓度基本达到Ⅳ类水质标准,大部分断面 NH₃-N 浓度达到Ⅳ类水质标准。

通过不同调水工况,排污口附近水质也有不同程度的改善。图 8(a)、(b)、(c)、(d)和图 9(a)、(b)、(c)、(d)分别为在调水前、调水 1m³/s、调水 2m³/s、调水 3m³/s 时的浓度场和流场。图 10 为排污口下游 200m COD 浓度和流速变化规律。图 11 为调水初期排污口下游 200 m 处断面 COD 浓度和流速变化规律。调水前,排污口排放污水,污染带很长,在距排污口下游 200 m 处 COD 浓度为 52 mg/L,高于Ⅴ类水质标准;调水为 1 m³/s 时,在距排污口下游 200 m 处 COD 浓度为 46 mg/L,高于Ⅴ类水质标准;调水为 2 m³/s 时,由于水量增加,流速为 0.6 m/s,在距排污口下游 200 m 处 COD 浓度为 40 mg/L,达到Ⅴ类水质标准;调水为 3 m³/s 时,清洁水源更加充足,流速为 0.8 m/s,在距离排污口下游 200 m 处 COD 浓度为 37 mg/L,优于Ⅴ类水质标准。

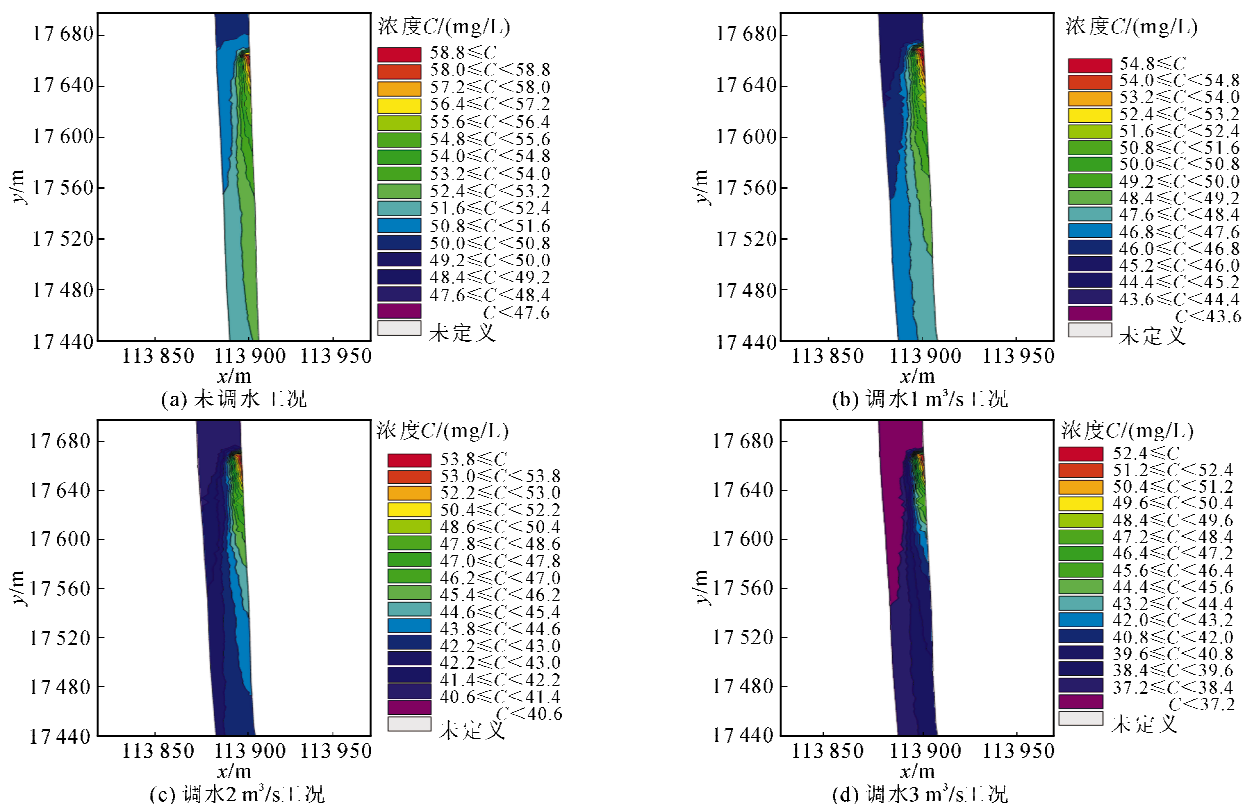


图 8 不同工况下排污口污染物浓度场

Fig. 8 The pollutant concentration field near the outfall in different working conditions

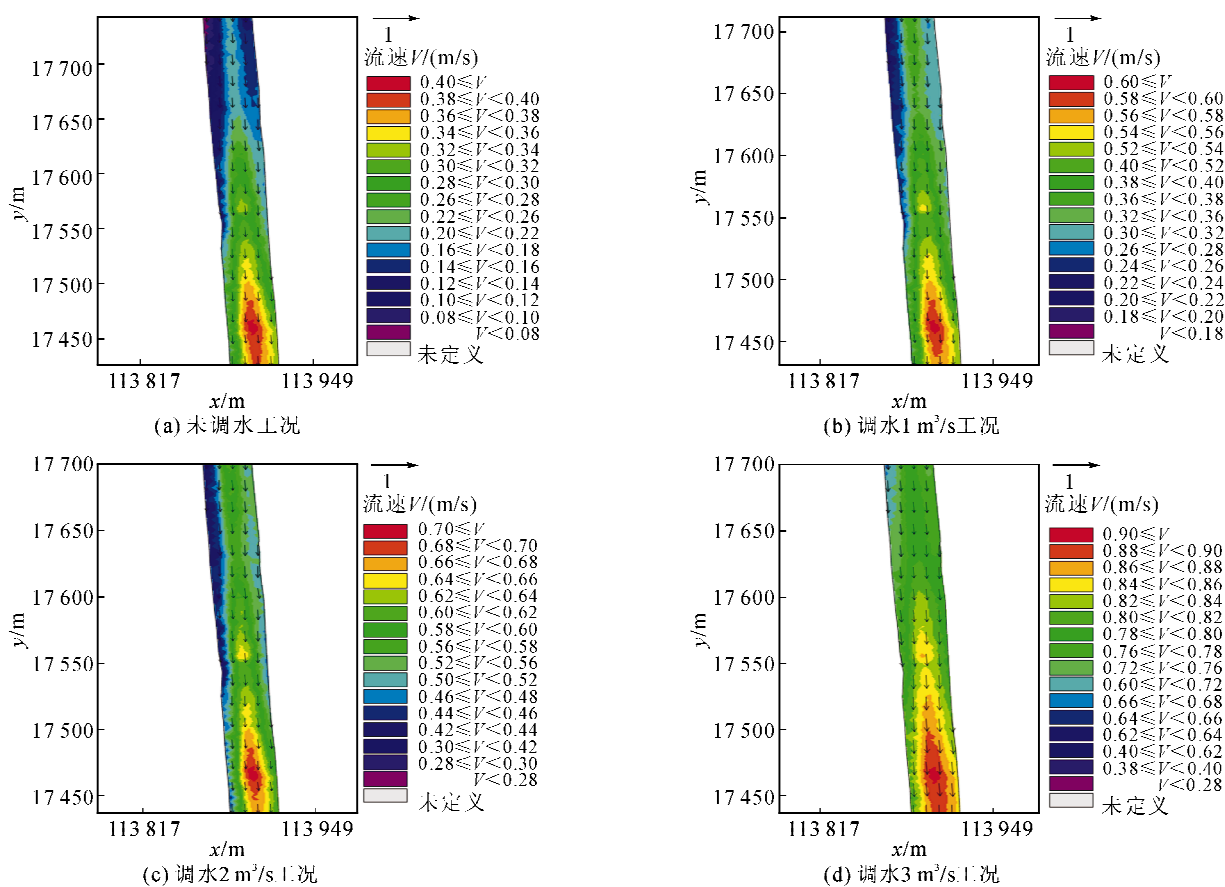


图 9 不同工况下排污口流场

Fig. 9 The flow field near the outfall in different working conditions

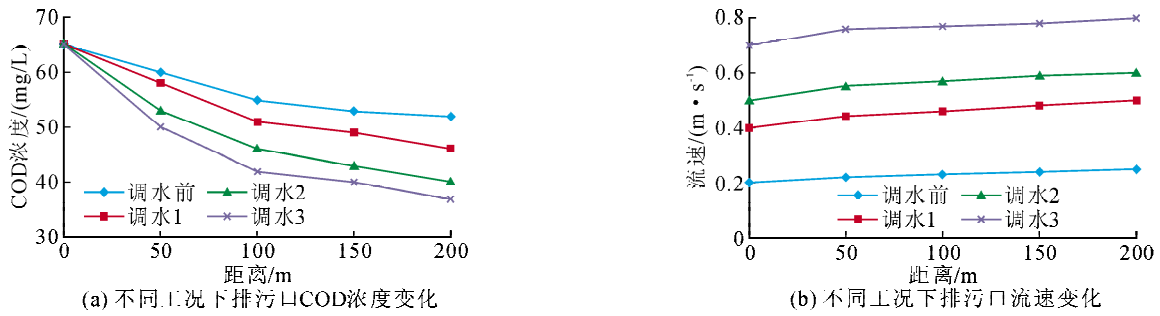


图 10 不同工况下排污口 COD 浓度变化和流速变化

Fig. 10 The change of COD concentration and velocity near the outfall in different working conditions

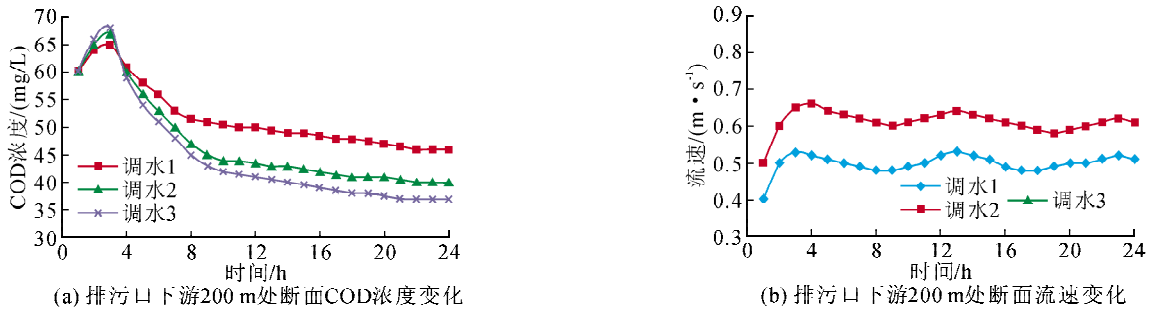


图 11 排污口下游 200m 处断面 COD 浓度变化和流速变化

Fig. 11 The change of COD concentration and velocity at the section of the outfall downstream 200 m

图 12、图 13 分别为未截污、截污时 107 国道桥断面污染物浓度变化。由图可以看出,在调水初期, COD、NH₃-N 浓度会出现瞬间骤增的现象,原因可能是在调水过程中,河流上游的污水冲积到下游,使河流下游污水大量积聚,从而使得 COD、NH₃-N 浓

度增大。在调水 20 h 后,水质浓度开始下降,在调水 25 h 后,水质浓度基本稳定,在调水 50 h 后,停止调水,水质浓度没有立刻升高,在停止调水 10 h 后,水质浓度增大,水质开始恶化,在调水 65 h 后,水质浓度处于稳定状态。

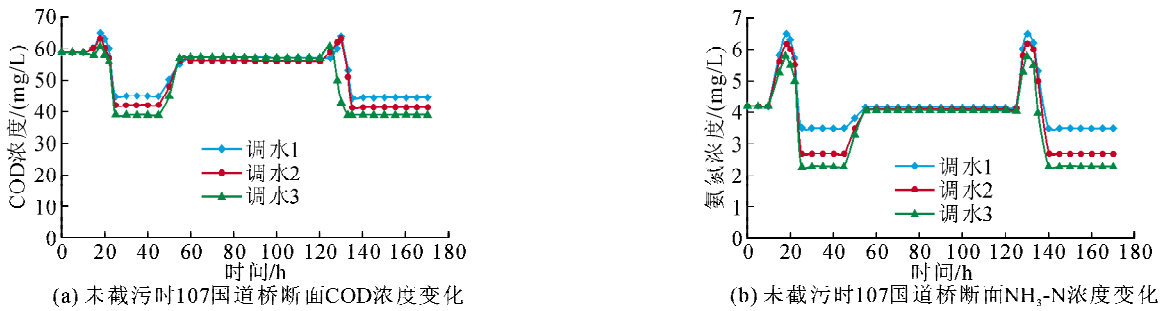


图 12 未截污时 107 国道桥断面污染物浓度变化

Fig. 12 The change of pollutant concentration of 107 national highway bridge section in no sewage interception

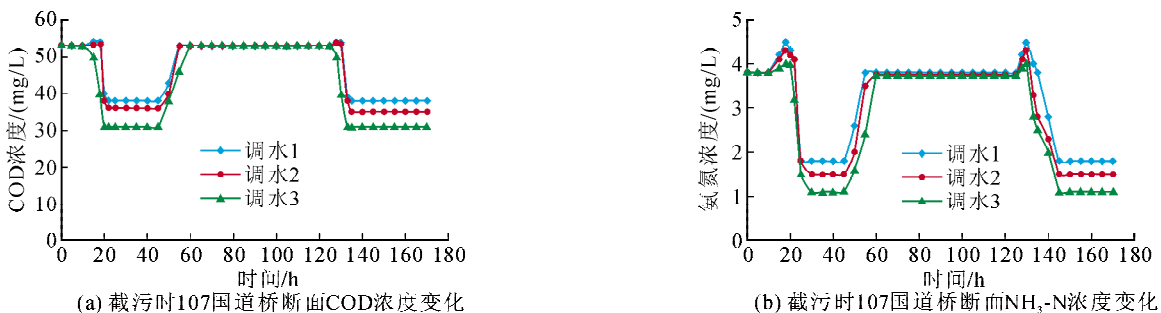


图 13 截污时 107 国道桥断面污染物浓度变化

Fig. 13 The change of pollutant concentration of 107 national highway bridge section in sewage interception

4 结 论

本文在对清溪河现状水质分析以及水文水质实测数值模拟的基础上,对清溪河生态调水进行了研究,结论如下:

1) 调水后清溪河市区段水质均有明显改善,调水期间未采取截污措施,调水流量为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,各断面污染物浓度基本达到 V 类水质标准;采取截污措施后,调水流量为 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,各断面 COD 浓度基本达到 IV 类水质标准,大部分断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 IV 类水质标准。

2) 生态调水对排污口附近水质影响最为明显,通过分析排污口附近浓度场变化,调水流量为 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,流速为 0.8 m/s ,污染带明显减小,水质改善效果显著。

3) 不考虑截污的情况下,清溪河许昌市区段排污口较多,排污量大,严重影响了河流水质改善效果,一旦停止调水,污水排入将直接威胁到清溪河水质。因此,要从根本上治理河流污染,在生态调水的同时必须采取截污措施。

参考文献:

- [1] 郝晓明,胡湛波,刘成,等. 南宁市竹排冲河道水体黑臭评价模型建立研究[J]. 华东师范大学学报,自然科学版:2011,1(1):163-171.
Hao Xiaoming, Hu Zhanbo, Liu Cheng, et al. Development of a black-odour prediction model for Nanning Zhupai Creek [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2011, 1(1): 163-171.
- [2] 程江,吴阿娜,车越,等. 平原河网地区水体黑臭预测评价关键指标研究[J]. 中国给水排水,2006,22(9):18-22.
Cheng Jiang, Wu Anuo, Che Yue, et al. Study on key indicators for judging black and odorous Water in area of plain river system [J]. China Water & Waste Water, 2006, 22(9): 18-22.
- [3] Song S K, Shon Z H, Kim Y K, et al. Characteristics of malodor pollutants and aromatic VOCs around an urban valley in Korea [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(10): 259-275.
- [4] Peter A, Koster O, Scildkeht A, et al. Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters [J]. Water Research, 2009, 43(8): 2191-2200.
- [5] 谢兴勇,钱新,张玉超,等. 引江济巢对巢湖的水环境影响分析[J]. 环境科学研究,2009,22(8):897-901.
Xie Xingyong, Qian Xin, Zhang Yuchao, et al. Effect on Chaohu lake water environment of water transfer from Yangtze river to Chaohu lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(8): 897-901.
- [6] 马巍,廖文根,李锦秀,等. 引水调控改善太湖湖湾水环境及其效果预测[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(1):52-56.
Ma Wei, Liao Wengen, Li Jinxiu, et al. Countermeasure of water diversion and regulation to improve the water environment of Taihu lake and prediction of its effect [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 52-56.
- [7] 匡翠萍,邓凌,刘曙光,等. 应急调水对太湖北部污染物扩散的影响[J]. 同济大学学报. 自然科学版:2011,39(3):395-399.
Kuang Cuiping, Deng Ling, Liu Shuguang, et al. Effect of emergent water diversion on diffusion of pollutant in northern Taihu lake [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(3): 395-399.
- [8] Carles I, Narcis P. The environmental impact of the Spanish national hydrological plan on the lower Ebro river and delta [J]. International Journal of Water Resources Development, 2003, 3(19): 485-500.
- [9] Khadka R B, Khanal A B. Environmental management plan (EMP) for melamchi water supply project, Nepal [J]. Environ Monit Assess, 2008, 146(1): 225-234.
- [10] 卢士强,徐祖信,罗海林,等. 上海市主要河流调水方案的水质影响分析[J]. 河海大学学报:自然科学版:2006,34(1):32-36.
Lu Shiqiang, Xu Zuxin, Luo Hailin, et al. Influence of water diversion schemes on water quality of Shanghai river networks [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2006, 34(1): 32-36.
- [11] 石建军,冯民权. 考虑生态径流过程的运行模式对文峪河梯级水库综合效益的影响[J]. 干旱地区农业研究:2014,32(2):222-227.
Shi Jianjun, Feng Minquan. Wenyuhe cascade reservoirs running with considering ecological runoff process and its impact on reservoirs original comprehensive benefits [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 222-227.
- [12] 张永永,黄强,姜瑾,等. 陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究[J]. 西安理工大学学报:2011,27(2):165-170.
Zhang Yongyong, Huang Qiang, Jiang Jin, et al. Research on the optimal allocation of water resources in benefited areas in water diversion from Han river to Wei river project [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(2): 165-170.
- [13] 梁斌,王超,王沛芳. “引江济太”工程背景下河网稀释净污需水计算及其应用[J]. 河海大学学报:自然科学版:2004,32(1):32-37.

- Liang Bin, Wang Chao, Wang Peifang, et al. Method for calculation of water demand by pollutant dilution and purification in river networks and its application to the Yangtze River Taihu lake water transfer project [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004, 32(1): 32-37.
- [14] 申海, 解建仓, 罗军刚, 等. 直觉模糊集的水库洪水调度多属性组合决策方法及应用[J]. *西安理工大学学报*, 2012, 28(1): 56-61.
- Shen Hai, Xie Jiancang, Luo Jungang, et al. Multiple attribute decision making combination method and application of intuition fuzzy set reservoir flood dispatching [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2012, 28(1): 56-61.
- [15] 王超, 逢勇, 崔广柏, 等. 张家港水环境调水实验研究及数学模型建立[J]. *环境科学与技术*, 2005, 28(5): 31-36.
- Wang Chao, Peng Yong, Cui Guangbo, et al. Water environment of Zhangjiagang: Experiment study of water transfer and setup of mathematic model [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(5): 31-36.
- (责任编辑 周蓓)
-
- (上接第 49 页)
- [3] Alguacil F J, Lopez F A, Garcia-Diaz I. Copper removal from acidic wastewaters using 2-hydroxy-5-nonylbenzaldehyde oxime as ionophore in pseudo-emulsion membrane with strip dispersion (PEMSD) technology [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, 18: 255-259.
- [4] Zhang Weidong, Cui Chunhua, Hao Zisu. Transport study of Cu(II) through hollow fiber supported liquid membrane [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, 18(1): 48-54.
- [5] Yusuke S, Takeshi N. Permeability and separation coefficient of carbon dioxide through glycol derivative supported liquid membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 469: 300-305.
- [6] Du J, Zhou K, Tao C Y. Advances in supported liquid membranes [J]. *Chemical Research and Application*, 2004, 16: 160-164.
- [7] Azzoug S, Arous O, Kerdjoudj H. Metallic ions extraction and transport in supported liquid membrane using organo-phosphoric compounds as mobile carriers [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, 2: 154-162.
- [8] Panja S, Ruhela R, Das A, et al. Carrier mediated transport of Pd(II) from nitric acid medium using Dithiodiglycolamide (DTDGA) across a supported liquid membrane (SLM) [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 449: 67-73.
- [9] Abhishek P, Santhi R P, Kaustubha M. Selective separation of Bisphenol A from aqueous solution using supported ionic liquid membrane [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 107: 70-78.
- [10] Gabriel Z, Inmaculada O, Ane U. Copper(I)-containing supported ionic liquid membranes for carbon monoxide/nitrogen separation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 438: 38-45.
- [11] Liu S C, Yang F, Zhang C H. Optimization of process parameters for supercritical carbon dioxide extraction of Passiflora seed oil by response surface methodology [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2009, 48: 9-14.
- [12] Cheok C Y, Chin N L, Yusof Y A. Optimization of total phenolic content extracted from *Garcinia mangostana* Linn. hull using response surface methodology versus artificial neural network [J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 40: 247-253.
- [13] Kalavathy M H, Iyyaswami R, Pillai M G, et al. Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H₃PO₄ activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM) [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2009, 70: 35-45.
- [14] 余晓皎, 李鹏, 张廉奉. N503 为载体的支撑液膜体系中 Cu(II) 的传输 [J]. *西安理工大学学报*, 2008, 24(3): 320-323.
- Yu Xiaojiao, Li Peng, Zhang Lianfeng. Transport of Cu(II) through a supported liquid membrane using N503 as a mobile carrier [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2008, 24(3): 320-323.
- (责任编辑 杨小丽)