

北方典型山区河道不同污染条件下水环境预测研究 ——以秃尾河为例

孙晋雯^a, 逢勇^{a,b}, 罗缙^a, 王晓^a

(河海大学 a. 环境科学与工程学院; b. 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)

摘要:建立了秃尾河在不同污染条件下的二维非稳态水流水质模型,基于水量、水质同步实测数据对模型进行了率定验证。运用所建模型对研究区域水流水质过程进行数值模拟,定量分析了研究区域在不同污染条件下的污染混合带长度及对污染源下游水质的影响程度。通过对不同污染条件下秃尾河下游的水质浓度场的计算分析,结果表明:在污水排放控制总量为1.80万t/d、不考虑降解系数的情况下,清水工业园混合带长度为60m,距离污染源8000m断面的水质COD、氨氮、石油类能达到地表水Ⅲ类水标准(GB3838-2002);而在污水排放控制总量为1.90万t/d、考虑降解系数的情况下,清水工业园混合带长度为64m,距离污染源9000m的断面水质COD、氨氮、石油类能达到地表水Ⅲ类水标准(GB3838-2002)。通过模型预测水环境是保护水环境的有效方法。

关键词:秃尾河; 污染条件; 水质标准; 模型

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0147-04

Prediction of water environment under different conditions of pollution in northern typical mountainous river: a case study in Tuwei River

SUN Jinwen^a, PANG Yong^{a,b}, LUO Jin^a, WANG Xiao^a

(a. College of Environmental Science and Engineering; b. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A 2-D unsteady hydrodynamic-water quality model was established for submerged area of Tuweihe in different conditions of pollution, and the simultaneous hydrodynamic and water quality data was used to calibrate and verify the model. The paper used the model to simulate the process of regional water flow and water quality, and quantitatively analyzed the length of pollution mixed band in the study area under different conditions and the impact of pollution on downstream water quality. Through the calculation and analysis of concentration field of water quality in downstream of Tuwei River under different conditions, the results showed that the total amount of sewage discharged is 18,000 t/d, without considering the degradation factor, the length of water mixed belt in Qingshui industrial park is 60m, the chemical oxygen demand(COD), ammonia nitrogen(NH₃-N) and total phosphorus(TP) in the cross section of 8000 m distance from water pollution can reach Ⅲ class standard of Chinese surface water (GB3838-2002); while the total amount of sewage discharged is 19,000 t/d, without considering the degradation factor, the length of water mixed belt in Qingshui industrial park is 64m, the chemical oxygen demand(COD), ammonia nitrogen(NH₃-N) and total phosphorus(TP) in the cross section of 9000 m distance from water pollution can reach Ⅲ class standard of Chinese surface water (GB3838-2002). Forecast of water environment by the model is an effective way to protect water environment.

Key words: Tuwei River; pollution condition; standard of water quality; model

水质模型是预测评价水环境的重要手段之一。在研究工程、工业废水及生活污水的环境影响时,往往需要二维非稳态模型进行分析研究。近几十年

来,国内外许多学者已做了大量的研究工作,提出了各种方法的水质模型,包括有限差分法、有限单元法、特征线法及有限体积法等^[1]。本文建立了二维

收稿日期:2013-12-08; 修回日期:2014-03-21

基金项目:国家科技重大专项项目(2012ZX07506-002)

作者简介:孙晋雯(1991-),女,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事水环境保护研究工作。

非稳态水流水质模型,对秃尾河的污染源的水流水质过程进行了数值模拟,计算了秃尾河沿线不同污水排放条件下污染源下游水质浓度场分布,对水质可达性进行了研究。

1 研究区域

秃尾河流域位于陕北黄土高原北部,毛乌素沙漠南缘,西与佳芦河接壤,东与窟野河相邻,介于北纬 38°16′~39°01′,东经 109°57′~110°31′之间。研究区域为采兔沟坝下至红柳沟下游 500 m。主要研究采兔沟坝下清水工业园在不同的污水排放条件下污染扩散带及对下游水质的影响。

2 基本方程

2.1 二维水动力模型

二维浅水方程和对流-扩散方程的守恒形式可表达为^[2-3]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & \bar{f}vh - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{ax}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x}\right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + hu_sS \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = & -\bar{f}uh - hg\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial x}\right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS \end{aligned} \tag{3}$$

该二维浅水方程基于 Bousinesq 涡粘假定和静压假定。方程中, t 为时间; x 和 y 为右手 Cartesian 坐标系; η 为水面相对于未扰动水面的高度即通常所说的水位; h 为总水深; $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 为垂向平均流速在 x 和 y 方向上的分量; p_a 为当地大气压; ρ 为水密度; ρ_0 为参考水密度; $f = 2\Omega\sin\varphi$ 为 Coriolis 力参数(其中 $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 为地球自转角速率, φ 为地理纬度); $\bar{f}v$ 和 $\bar{f}u$ 为地球自转引起的加速度; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平粘滞应力项; S 为源汇项; (u_s, v_s) 为源汇项水流流速。

2.2 湍流模型

湍流建模采用大涡模拟方法中的 Smagorinsky 压格子尺度模型。该模型用一个与特征长度尺度相关的有效涡粘值来描述亚网格尺度输移^[4-5]。亚网

格尺度涡粘值由下式给出:

$$A = c_s^2 I^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{4}$$

式中: c_s 是定值, I 是特征长度, 形变率由下式给出:

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (i, j = 1, 2) \tag{5}$$

底部应力 $\bar{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ 遵循二次摩擦定律:
$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \tag{6}$$

式中: c_f 是阻力系数, $\bar{u}_b = (u_{bx}, u_{by})$ 是底部水流滑移速度。

对于二维计算而言, $\bar{u}_b$ 是关于水深的平均速度, 阻力系数可以由曼宁系数 M 得到。

$$c_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2} \tag{7}$$

曼宁数可以由底床糙率长度得到:

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \tag{8}$$

2.3 二维水质模型

二维水质模型采用是 MIKE 21 FM 的对流扩散模块^[6-7], 该模块可基于非结构网格的污染物质在湖泊、河流、河口、沿岸带和海区的迁移扩散现象的简单水质模型, 其衰减系数仅是简单的一级衰减反应系数; 而且可以设定不同类型的扩散系数来反映在不同的水动力条件下不同类型物质的扩散现象。

采用对流扩散方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x_i} + v\frac{\partial C}{\partial y_i} = D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \tag{9}$$

式中: C 为浓度; D_x, D_y 为 x 和 y 方向上的扩散系数; $u\frac{\partial C}{\partial x_i} + v\frac{\partial C}{\partial y_i}$ 为对流部分; $D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$ 为扩散部分。

2.4 率定验证

运用 2013 年 3 月 24 日至 3 月 26 日秃尾河流域野外实测水质结果, 对秃尾河水流水质模型计算参数进行率定验证, 结果表明: 计算结果与实测值拟合效果较好, 平均相对误差在 10%~20% 之间, 所建模型能够较准确地反映秃尾河水流水质浓度的动态变化过程^[8-10]。率定得到纵向及横向扩散系数分别取为 33 m²/s 和 0.02 m²/s, COD、氨氮和石油类的降解系数分别取 0.11、0.10 和 0.08 d⁻¹。图 1 给出水质参数计算值与实测值的对比结果。

3 秃尾河下游水质可达性研究

3.1 计算条件

(1) 资料来源: 选用 2013 年 3 月 24 日~2013

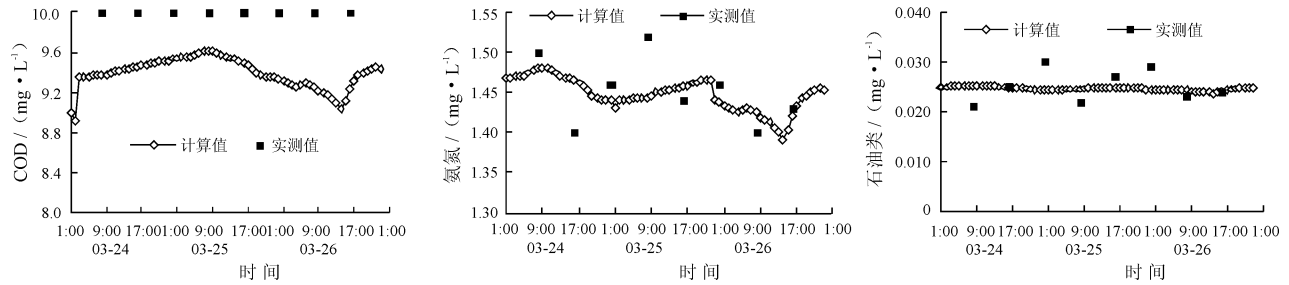


图 1 模型率定验证结果图

年 3 月 26 日,选用 1956 – 2009 年采兔沟坝下水文站的逐年天然径流量实测资料进行频率分析。

(2)水文频率分析:秃尾河流域主要水文站径流频率分析结果为采兔沟大坝最小下泄流量在 90% 保证率下的最小月平均流量值为 0.48 m³/s。

(3)设计污水排放量选取:考虑到工程实施后采兔沟坝下水量减少对断面水环境容量影响,本项目污水将进入清水工业园污水处理厂处理后排放,COD、氨氮、石油类的排放浓度分别是 50、7.5、0.3 mg/L。

3.2 水质可达性分析

(1)计算方案。本研究主要计算现状污染源、

不同降解系数下污染源下游的水质浓度场分布,水质浓度场计算方案一为污水排放控制总量为 1.80 万 t/d,计算方案二为污水排放控制总量为 1.90 万 t/d。不同排放量条件下降解系数方案见表 1。

(2)计算结果与讨论。在计算初始条件为实测水质时,两种方案下游水质浓度场分布见图 2。

表 1 降解系数方案表 d⁻¹			
降解系数	COD	氨氮	石油类
方案 1	0	0	0
方案 2	0.11	0.10	0.08

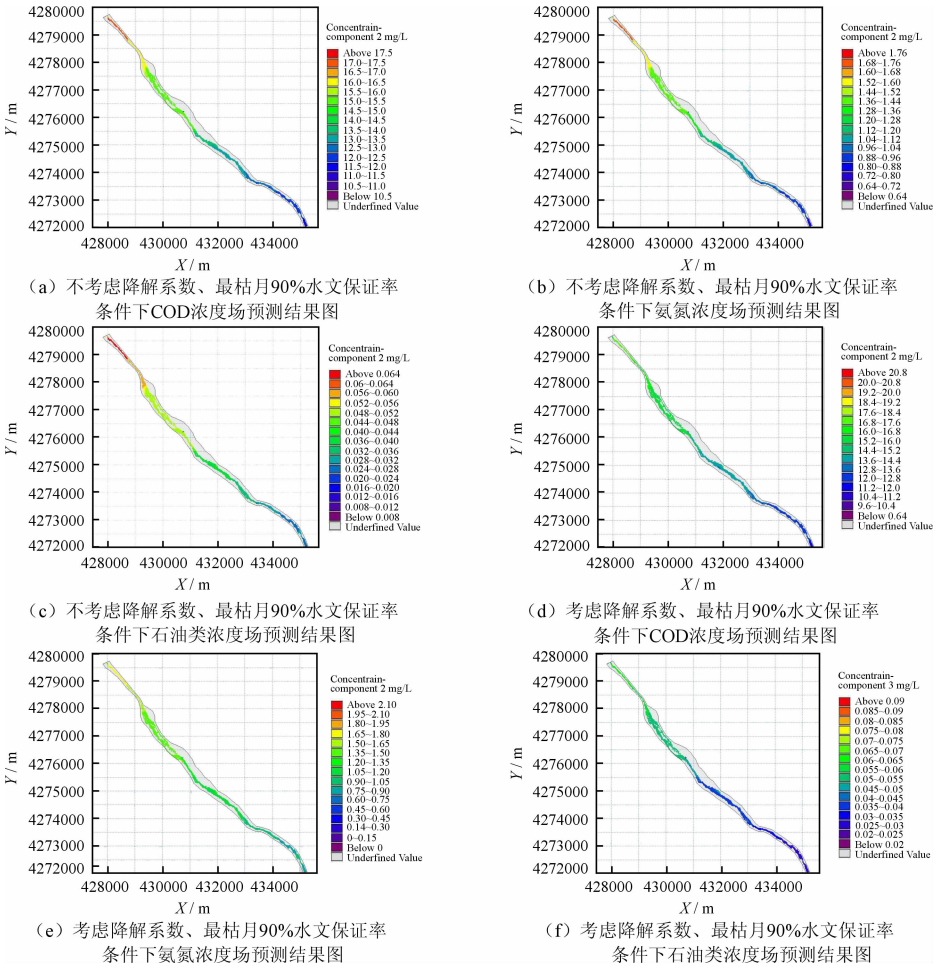


图 2 采兔沟坝下不同降解条件下水质浓度场图

计算结果表明:

(1)在污水排放控制总量为 1.80 万 t/d、不考虑降解系数的情况下,清水工业园混合带长度为 60 m;而在污水排放控制总量为 1.90 万 t/d、考虑降解系数的情况下,清水工业园混合带长度为 64 m。混合带长度随污水排放控制总量增大而增大。

(2)在污水排放控制总量为 1.80 万 t/d、不考虑降解系数的条件下,距离污染源 8 000 m 的断面的水质能达到地表水Ⅲ类水标准;污水排放控制总量为 1.90 万 t/d、考虑降解系数的条件下,距离污染源 9 000 m 的断面水质能达到地表水在Ⅲ类水标准。污水排放控制总量相对于降解系数对水质影响更大。

4 结 语

本文建立了秃尾河工程二维非稳态浅水湍流水动力-水质模型,以 90% 水文保证率下的最小月平均流量作为水文设计条件,对不同污水排放控制总量及不同降解系数条件下,研究区域水流水质进行了模拟计算,从而定量预测了秃尾河水质情况,在计算初始条件为实测水质时,秃尾河坝下流量为 90% 水文保证率下,污水排放控制总量为 1.80 万 t/d、不考虑降解系数及污水排放控制总量为 1.90 万 t/d、考虑降解系数的条件下的秃尾河污染源排污口下游水质浓度场分布计算结果表明:

(1)二维非稳态浅水湍流水动力-水质模型具有较高的计算精度,可用于水流水质过程模拟计算。

(2)只要污水排放控制总量在 1.90 万 t/d 以下且氨氮排放浓度控制在 7.50 mg/L 左右,在 K5 断面 COD、氨氮和石油类水质浓度都能达到Ⅲ类水标准。

(3)在工业园排放断面的水质也可满足农业用

水的Ⅴ类水质要求,对农业灌溉不会造成影响。

综上,清水工业园建设运行后,只要工业园污水水量、浓度控制在合理范围要求之内并科学运用、合理调度,可给当地经济带来不可估量的效益。

参考文献:

- [1] 赵棣华,戚晨,庾维德,等. 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展,2000,11(4): 368-374.
- [2] 赵棣华,李提来,陆家驹. 长江江苏段二维水流-水质模拟[J]. 水利学报,2003,34(6):72-77.
- [3] 丁玲,吴建强,逢勇. 长江泰州江段水环境模拟及水质可利用性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(1):224-28.
- [4] Zhao D H, Shen H W, Lai J S, et al. Approximate riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12): 692-702.
- [5] 丁玲,逢勇,吴建强,等. 模拟水质突跃问题的三种二阶高性能格式[J]. 水利学报,2004,35(9): 50-55.
- [6] 胡四一,谭维炎. 无结构网格上二维浅水流动的数值模拟[J]. 水科学进展,1995,6(1):1-9.
- [7] Zhao D H, Shen H W, Tabios III G Q, et al. Finite - Volume Two - Dimensional Unsteady - Flow Model for River Basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(7):863-883
- [8] 孙卫红,逢勇,姚国金. 基于不均匀系数的水环境容量计算方法探讨[J]. 水资源保护,2001,17(2):25-26+44.
- [9] 徐贵泉,褚君达,吴祖扬,等. 感潮河网水环境容量数值计算[J]. 环境科学学报,2000,20(3):263-268.
- [10] 逢勇,唐洪武,王国祥,等. 镇江水环境质量改善与生态修复技术研究及综合示范研究报告[R]. 南京:河海大学,2007.