

Water Quality Simulation of Taolinkou Reservoir Based on WASP Model

Tianjiao Dai¹, Lin Zhao¹, Liang Chen¹, Chenya Feng¹, Qi Liu¹, Mingjie Zhao²

¹School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin

²Qinhuangdao Tianda Environmental Protection Research Institute, Qinhuangdao Hebei

Email: 422124043@qq.com

Received: Aug. 7th, 2019; accepted: Aug. 29th, 2019; published: Sep. 17th, 2019

Abstract

In order to grasp the future water quality changes of Taolinkou Reservoir in Qinhuangdao, the total phosphorus (TP), nitrate nitrogen (NO₃-N), ammonia nitrogen (NH₃-N), permanganate index (COD_{Mn}) and dissolved oxygen (DO) were selected. Based on these five water quality monitoring data in 2014-2015 at the water source and the outbound stations, the parameters of WASP model were determined and then used to predict water quality of Taolinkou Reservoir in 2016 and 2017. The results show that the R² of the simulated values of the five water quality indicators of the WASP model is greater than 0.7, and the correlation coefficient is greater than 0.83; the relative error between the measured values and the simulated values of the water quality indicators is generally less than 10%. It is shown that the established WASP can simulate water quality well and apply to the prediction and early warning system of Taolinkou Reservoir. At the same time, it provides decision-making reference and basis for Qinhuangdao water environmental protection and management work.

Keywords

Water Quality, Simulation, WASP Model, Taolinkou Reservoir

基于WASP模型的桃林口水库水质模拟研究

戴天骄¹, 赵林¹, 陈亮¹, 冯琛雅¹, 刘琦¹, 赵明杰²

¹天津大学环境科学与工程学院, 天津

²秦皇岛天大环保研究院有限公司, 河北 秦皇岛

Email: 422124043@qq.com

收稿日期: 2019年8月7日; 录用日期: 2019年8月29日; 发布日期: 2019年9月17日

作者简介: 戴天骄, 1995年2月生, 籍贯: 天津, 研究生, 研究方向: 水环境管理。

文章引用: 戴天骄, 赵林, 陈亮, 冯琛雅, 刘琦, 赵明杰. 基于 WASP 模型的桃林口水库水质模拟研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(5): 499-507. DOI: 10.12677/jwrr.2019.85057

摘要

为掌握秦皇岛桃林口水库未来水质变化的状况,本文选取总磷(TP)、硝酸盐氮(NO₃-N)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和溶解氧(DO)等5项水质指标,基于2014~2015年水源站和出库站两个监测站的5项水质指标的监测数据,确定WASP模型的参数;再根据水源站2016、2017年5项水质指标来预测出库站的水质情况。研究结果表明:该WASP模型对5项水质指标的模拟值的判定系数R²均大于0.7,相关系数r均大于0.83;各项水质指标的实测值与模拟值的相对误差一般低于10%。WASP模拟效果良好,可以运用到桃林口水库的预测预警系统中和水库水质预测与管理的工作中,同时为秦皇岛市青龙县水环境保护与管理工作提供决策性参考与依据。

关键词

水质, 模拟, WASP模型, 桃林口水库

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水质预测是对研究的水体的质量做出未来的预测,是水污染综合防治的基础工作。自上世纪中期开始,随着经济的快速发展、城市化进程的加快,水体污染问题受到广泛的关注,对水环境质量变化趋势进行的预测分析愈加受到重视。常用的水质预测方法主要有水质模型、灰色系统理论、神经网络等[1]-[6]。

水质模型是较早引入水质预测的方法之一,是可以随时间和空间的变化,定量地描述环境污染物在水体中迁移转化规律以及其他因素之间相互影响的数学表达方式[7]。水质模型的发展,主要可以分为三个阶段。第一阶段(1925~1970年):此阶段主要研究水体水质本身,研究中,除了水质成分外,其余都是外部输入。第二阶段(1970~1985年):此阶段模型的特点在于状态变量的增长,使面源污染能被连入初始输入[8]。第三阶段(1985年至今):此阶段是水质模型广泛应用和深入研究的时期。

水质模型现今处于广泛应用及深入研究的时期,在于完善 QUAL、WASP 等多介质的水质模型,在我国 WASP 水质模型针对不同水体都取得了进一步的研究与发展。张佩芳[9]等对淮沭新河东海段的 COD 和 DO 等应用 WASP7 模型的 EUTRO 子模块进行模拟研究,结果表明 COD 和 DO 的模拟值与实测值的相对误差在 10% 和 15% 以内,两者的模拟结果良好。唐国平[10]等基于丹金溧漕河 2015 年的水质数据,选用 WASP 水质模型的 EUTRO 模型对水质指标总磷、氨氮、化学需氧量等进行模拟,研究表明判断系数 R² 在 0.75 以上,模拟结果的吻合度较高。徐斌[11]等以 WASP 水质模型为工具,对伊通河农安段水质进行水质数值模拟,研究结果显示 WASP 水质模型可以对伊通河农安城区段水质进行有效的模拟预测,模拟和实测水位波动值相关系数为 0.97。

本文主要针对秦皇岛市桃林口水库水源地保护的相关问题,通过对水库水质模型的构建与模拟,来对桃林口水库的水质模拟和保护产生实际意义,同时,对于我国北方的大型水库水质模型的研究和水源地保护的研究具有借鉴作用。

2. 研究区

2.1. 桃林口水库概况

桃林口水库位于秦皇岛市西北部,滦河支流青龙河上,于 1998 年建成,控制流域面积 5060 平方公里,总

库容 8.59 亿立方米，每年可为秦皇岛市提供 1.82 亿立方米，为唐山、秦皇岛地区补充农业水源 5.2 亿立方米。桃林口水库是一座具有城市供水、农业灌溉、防洪以及发电等综合效益的大型水利枢纽工程[12]，其水质对青龙县乃至秦皇岛市的社会稳定和经济发展起着举足轻重的作用。

本研究选取桃林口水库水源站和出库站两个监测断面水质指标数据建立 WASP 模型，利用水源站的水质指标监测值模拟出库站水质指标值。水源站和出库站的地理位置图如图 1 所示。



Figure 1. Location map of each monitoring point of Taolinkou Reservoir
图 1. 桃林口水库各监测点地理位置图

2.2. 研究数据

样本集数据来源于 2014~2015 年桃林口水库水源站和出库站两个监测站的水质监测的监测资料，利用 2016~2017 年水源站的监测数据对出库站的总磷(TP)、硝酸盐氮(NO₃-N)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和溶解氧(DO)等 5 项水质指标进行模拟研究。

3. WASP 模型的建立

3.1. WASP 模型原理

WASP 模型本质上是利用各个物质的质量平衡方程，通过平移扩散的公式，来描述水体中各种物质的迁移和转化。WASP 模型的质量平衡方程[13]如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(U_x C)}{\partial t} - \frac{\partial(U_y C)}{\partial t} - \frac{\partial(U_z C)}{\partial t} + \frac{\partial\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right)}{\partial t} + S_L + S_B + S_K \quad (1)$$

式中： C 为水质组分的浓度，mg/L； T 为时间步长，d； U_x ， U_y ， U_z 为纵向、横向和垂向速度，m/d； E_x ， E_y ， E_z 为纵向、横向和垂向扩散系数，m²/d； S_L 项为点源和面源负荷，g/m³； S_B 项为边界负荷，g/m³； S_K 项为水质组分的总转化率，g/m³·d。

假设水体的垂向和横向是均匀的，将可以得到以下的一维水质组分的运动方程：

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = \frac{\partial\left(-U_x AC + E_x A \frac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial x} + AS_L + AS_B + AS_K \quad (2)$$

式中：A 为水体的截面面积，m²；其余方程符号意义同上。

3.2. WASP 模型建立

WASP 模型的建立需要输入水源站和出库站两个监测断面的基本信息，包括一维河流的物理模型，长度、宽度、水深、流量等，还有气象条件如水温、光照等，边界参数、水化学参数及相应的动力学参数。本研究基于 2014~2015 年水源站和出库站两个监测站的监测数据来建立 WASP 模型，通过试算法确定参数的调节和选定，其中的动力学参数的设定参考了用户手册和通过相关资料的参数取值确定，如表 1 所示，而其他相关数据从秦皇岛市青龙县环境监测站相关部门获得。

Table 1. Main kinetic parameters of WASP model

表 1. WASP 模型主要动力学参数

参数名称	取值	单位	范围
20℃时 COD 衰减速率	0.06		0~5.6
COD 温度系数	1.05	d ⁻¹	0~1.07
20℃时氨氮硝化速率	0.02		0~10
氨氮温度系数	1.043		0~1.07
20℃时溶解性有机磷的矿化率	0.1	d ⁻¹	0~0.22
溶解性有机磷的温度系数	1.06		0~1.08
20℃时的复氧系数	0.88	d ⁻¹	0~10
氧碳比	1.22		0~2.67
20℃反硝化速率常数	0.02	d ⁻¹	0~0.09
反硝化的温度系数	1.04		0~1.04

4. WASP 模型模拟结果分析

基于 2014~2015 年水源站和出库站两个监测站的监测数据建立的 WASP 模型，根据 2016~2017 年水源站 5 项指标模拟出的出库站各项指标模拟值和实测值对比如图 2 所示，相对误差计算结果见表 2、表 3。由图 2 可知 WASP 模型对于各项水质指标的模拟值和实测值的重合度是较高的，趋势一致，偶有偏差，但是从整体上的趋势可以看到重合度很高，可见 WASP 模型对各项水质指标的拟合结果较为理想。由图 2 仍可见，桃林口水库 6~9 月的总磷、氨氮和高锰酸盐指数含量与其他月份相比相对较高，但 6~9 月时溶解氧含量与其他月份相比相对较低。可能是因为桃林口水库丰水期在 6~9 月，这段时期水库的水温较于其他时间较高，有利于微生物的繁殖生长，微生物的繁殖生长过程会消耗水中的溶解氧，致使溶解氧含量在丰水期较低，总磷、氨氮和高锰酸盐指数等浓度较高，因此桃林口水库 6~9 月的水质较于其他时期较差，这与王佳[14]等的研究结果一致。

由表 2 可知，总磷实测值与模拟值的平均相对误差为 9.4%，其中相对误差在 10%以下的有 8 组(共 13 组数据)，占 61.5%；硝酸盐氮实测值与模拟值的平均相对误差为 3.84%，其中相对误差在 5%以下的有 8 组(共 13 组数据)，占 61.5%。由表 3 可知，氨氮实测值与模拟值的平均相对误差为 29.57%，其中相对误差在 30%以下的有 8 组(共 13 组数据)，占 61.5%；高锰酸盐指数实测值与模拟值的平均相对误差为 7.31%，其中相对误差在 10%以下的有 11 组(共 13 组数据)，占 84.62%；溶解氧实测值与模拟值的平均相对误差为 5.35%，其中相对误差在

10%以下的有 10 组(共 13 组数据), 占 76.92%。由于在对桃林口水库水质进行监测的过程中可能会有人为误差的存在, 所以从整体上来看 WASP 模型的模拟结果良好, 该模型可用于桃林口水库水质预测与管理工。且氨氮 2016~2017 年实测值的平均值为 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中小于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的监测值有 10 组(共 13 组数据), 占 76.92%, 可见氨氮浓度较低, 对于浓度较低的指标监测时, 监测仪误差较大[9], 因此模拟出的氨氮模拟值与实测值的相对误差较高。WASP 模型模拟出的模拟值与实测值之间存在误差的原因还有可能是桃林口水库水体中各种反应

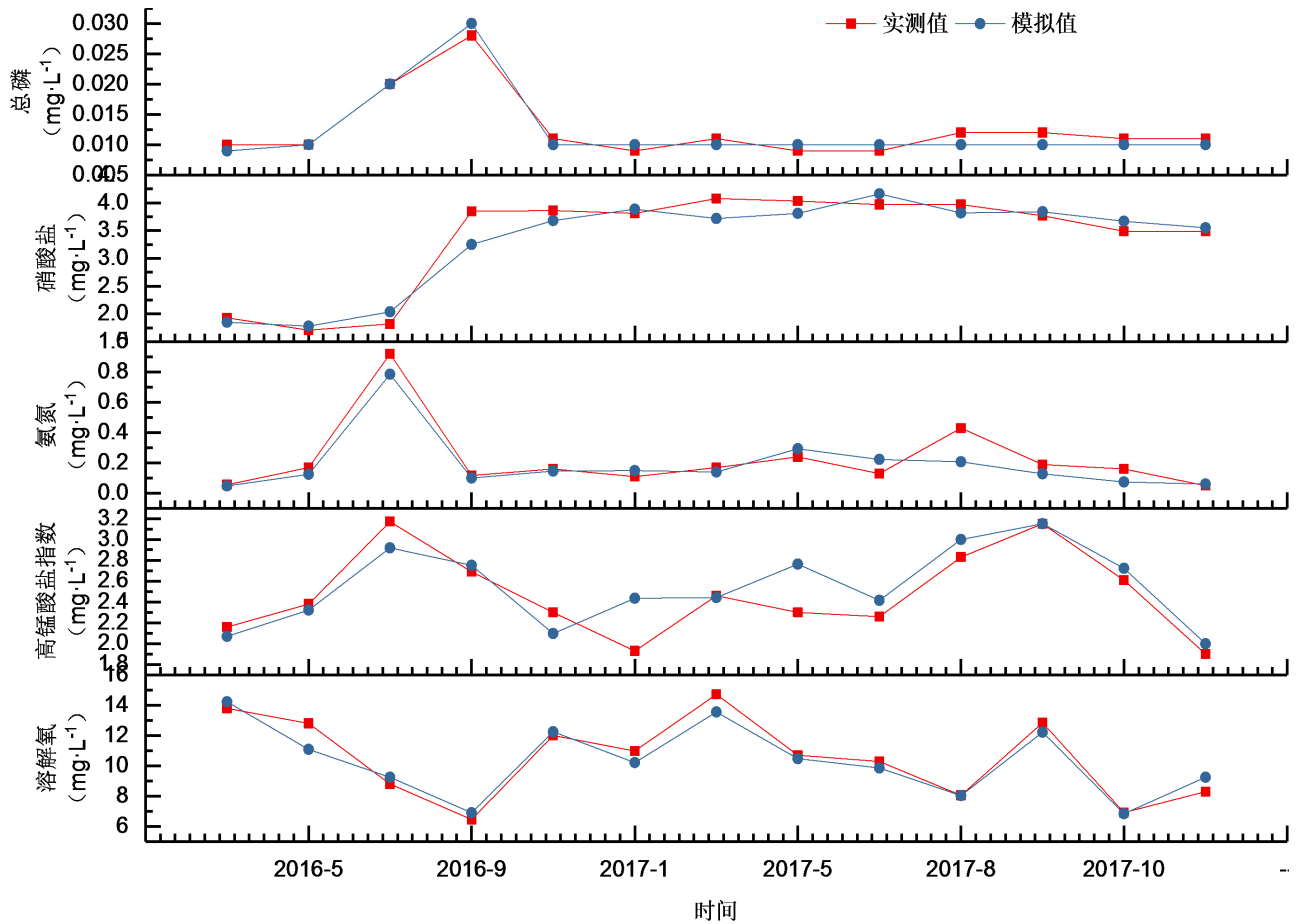


Figure 2. Comparison of measured and simulated values of water quality indicators

图 2. 各水质指标实测值和模拟值对比图

Table 2. Error analysis of simulation results of total phosphorus, nitrate, ammonia nitrogen, permanganate index and dissolved oxygen (unit: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

表 2. 总磷、硝酸盐、氨氮、高锰酸盐指数和溶解氧模拟结果误差分析(单位: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

时间	总磷			硝酸盐			氨氮			高锰酸盐指数			溶解氧		
年.月	实测值	模拟值	相对误差	实测值	模拟值	相对误差	实测值	模拟值	相对误差	实测值	模拟值	相对误差	实测值	模拟值	相对误差
2016.3	0.01	0.009	-10.00%	1.93	1.95	1.04%	0.056	0.049	-12.50%	2.16	2.07	-4.17%	13.8	14.23	3.12%
2016.5	0.01	0.01	0.00%	1.71	1.75	2.34%	0.17	0.125	-26.47%	2.38	2.321	-2.48%	12.8	11.08	-13.44%
2016.7	0.02	0.02	0.00%	1.82	1.98	8.79%	0.92	0.785	-14.67%	3.17	2.92	-7.89%	8.8	9.25	5.11%
2016.9	0.028	0.03	7.14%	3.85	3.65	-5.19%	0.117	0.101	-13.68%	2.69	2.751	2.27%	6.45	6.9	6.98%

Continued

2016.11	0.011	0.01	-9.09%	3.86	3.95	2.33%	0.16	0.146	-8.75%	2.3	2.096	-8.87%	12	12.24	2.00%
2017.1	0.009	0.01	11.11%	3.81	4.05	6.30%	0.11	0.15	36.36%	1.93	2.435	26.17%	10.98	10.21	-7.01%
2017.3	0.011	0.01	-9.09%	4.08	4.2	2.94%	0.17	0.1399	-17.71%	2.46	2.443	-0.69%	14.72	13.551	-7.94%
2017.5	0.009	0.01	11.11%	4.03	3.82	-5.21%	0.24	0.2938	22.42%	2.3	2.762	20.09%	10.7	10.4758	-2.10%
2017.7	0.009	0.01	11.11%	3.97	4.12	3.78%	0.13	0.223	71.54%	2.26	2.416	6.90%	10.28	9.85	-4.18%
2017.8	0.012	0.01	-16.67%	3.97	3.82	-3.78%	0.43	0.2087	-51.47%	2.83	2.999	5.97%	8.05	8.04	-0.12%
2017.9	0.012	0.01	-16.67%	3.77	3.84	1.86%	0.19	0.1283	-32.47%	3.15	3.151	0.03%	12.85	12.21	-4.98%
2017.1	0.011	0.01	-9.09%	3.49	3.67	5.16%	0.16	0.0742	-53.63%	2.61	2.723	4.33%	6.92	6.8432	-1.11%
2017.11	0.011	0.01	-9.09%	3.49	3.53	1.15%	0.05	0.0614	22.80%	1.9	1.999	5.21%	8.3	9.25	11.45%

机制十分复杂，相较于模型公式而言实际水体更为复杂，使得实测值与模型公式产生差别所致的误差[15]。

$$r_{XY} = r_{YX} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

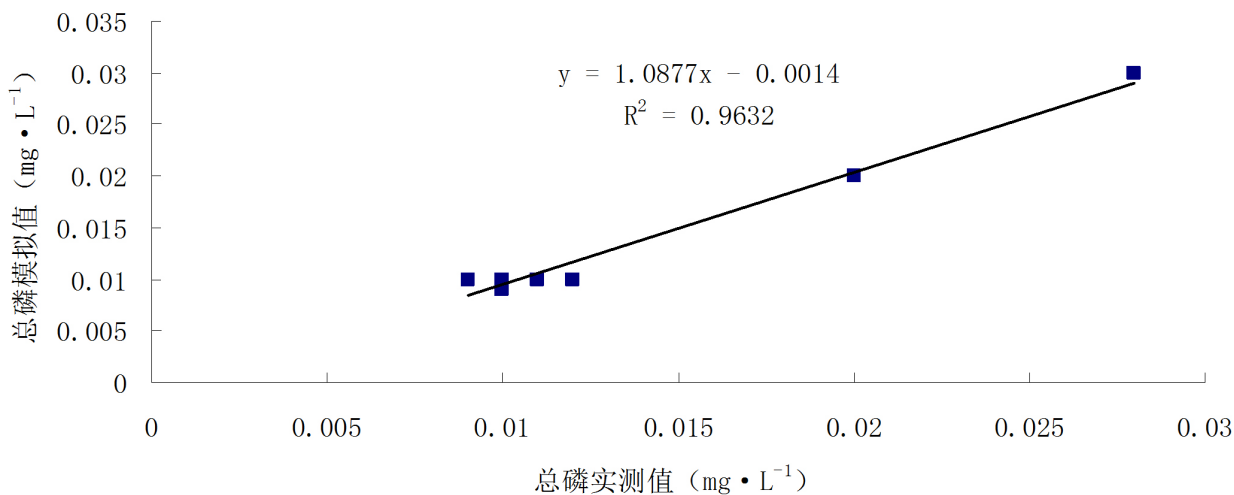
式中： r_{XY} 为某水质指标实测值和模拟值的相关系数； X_i 为该水质指标的实测值， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； \bar{X} 为该水质指标实测值的平均值， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； Y_i 为该水质指标的模拟值， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； \bar{Y} 为该水质指标模拟值的平均值， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

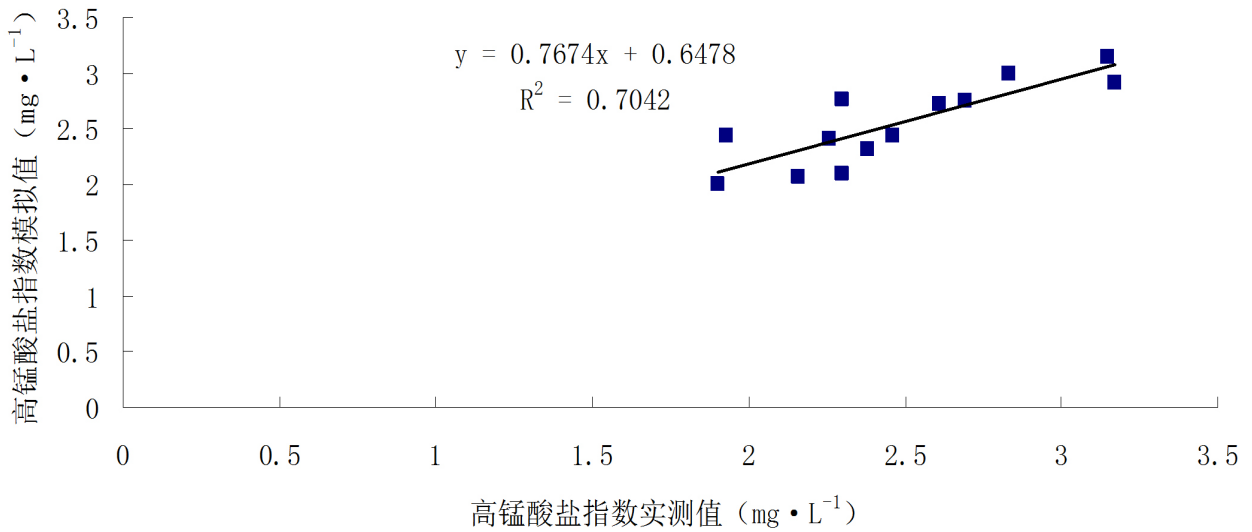
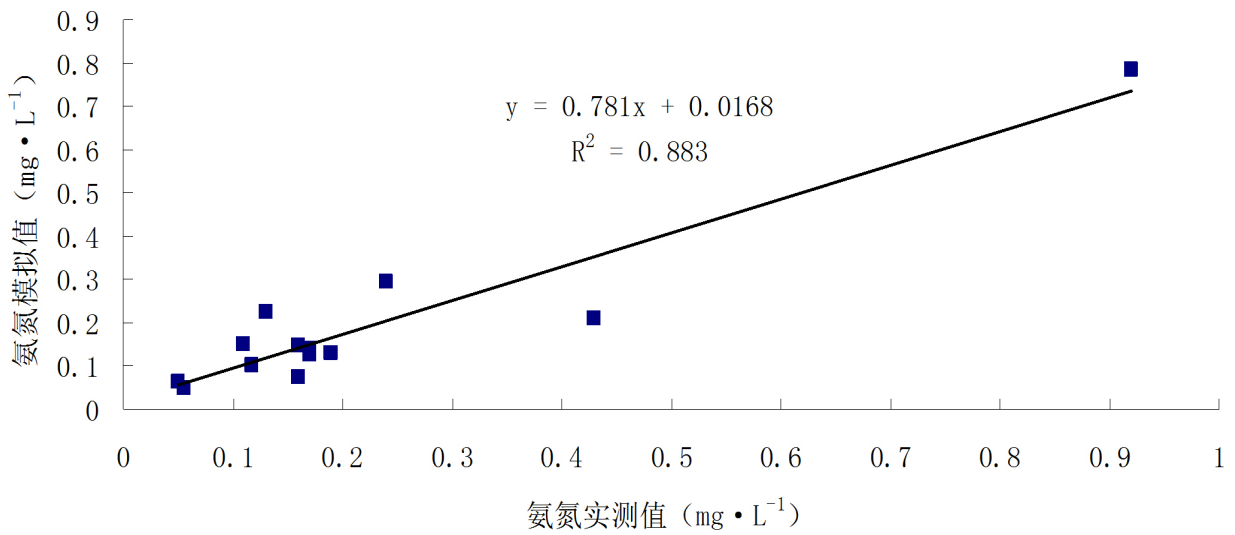
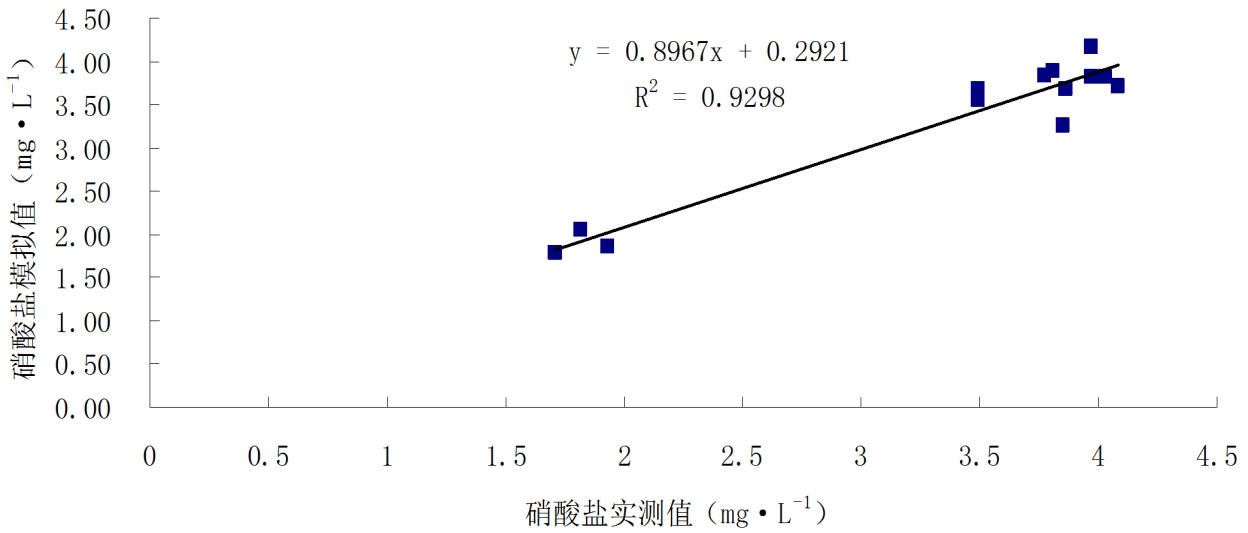
由表 3、图 3 可知，各项水质指标的判定系数 R^2 均大于 0.7，相关系数 r 均大于 0.839；除高锰酸盐指数外，总磷、硝酸盐氮、氨氮和溶解氧的判定系数 R^2 均大于 0.883，相关系数 r 均大于 0.9，其中总磷、硝酸盐氮和溶解氧的相关系数 r 均大于 0.95，可见所建立的 WASP 模型模拟出的模拟值与实测值吻合度很高，具有较好的相关性。

Table 3. 2016-2017 simulation results analysis

表 3. 2016~2017 年模拟结果分析

	总磷	硝酸盐	氨氮	高锰酸盐指数	溶解氧
判定系数 R^2	0.9632	0.9298	0.883	0.7042	0.93
相关系数 r	0.98142753	0.964261	0.939681	0.839166	0.964365





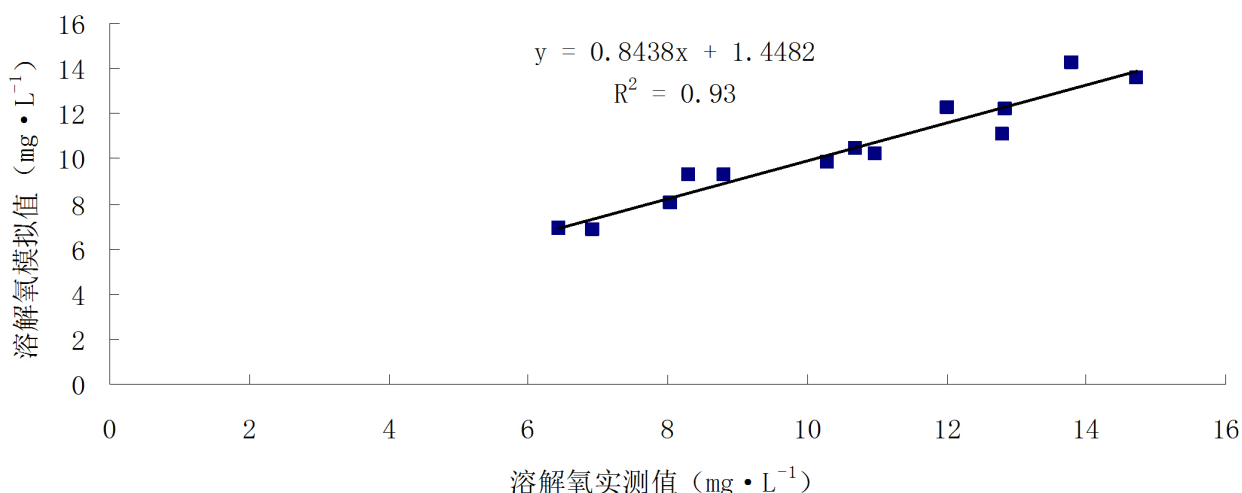


Figure 3. Linear regression equation for each water quality index

图 3. 各水质指标的线性回归方程

5. 结论

运用 WASP 模型对桃林口水库的总磷、硝酸盐氮、氨氮、高锰酸盐指数和溶解氧等水质指标进行模拟研究。研究表明，该五项水质指标的模拟值与实测值吻合度很高，具有较好的相关性，判定系数 R^2 均大于 0.7，相关系数 r 均大于 0.83，证明建立的 WASP 模型适用于桃林口水库，可以运用于桃林口水库水质预测与管理的工作中，同时为秦皇岛市青龙县水环境保护与管理提供决策性参考与依据。

致 谢

感谢我的导师赵林老师、陈亮老师和我的朋友们冯琛雅和刘琦的无私帮助，希望我们能依旧开心乐观地度过每一天、越过每一个困难，做最善良舒服的自己。

基金项目

项目编号：17273905D，项目名称：水质自动监测系统在地表水水库生态安全预警中的应用研究。

参考文献

- [1] MA, X. X., SHANG, X., WANG, L. C., DAHLGREN, R. A. and ZHANG, M. H. Innovative approach for the development of a water quality identification index—A case study from the Wen-Rui Tang River watershed, China. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 55(5): 112-124.
- [2] 孙兆兵, 王保良, 冀海峰, 黄志尧, 李海青. 基于概率组合的水质预测方法[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(10): 1657-1662. SUN Zhaobing, WANG Baoliang, YAN Haifeng, HUANG Zhixi and LI Haiqing. Water quality prediction method based on probability combination. *China Environmental Science*, 2011, 31(10): 1657-1662. (in Chinese)
- [3] 袁从贵. 最小二乘支持向量回归及其在水质预测中的应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012. YUAN Conggui. Least squares support vector regression and its application in water quality prediction. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 刘双印. 基于计算智能的水产养殖水质预测预警方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. LIU Shuangyin. Research on prediction and early warning method of aquaculture water quality based on computational intelligence. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [5] 李如忠. 水质预测理论模式研究进展与趋势分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 29(1): 26-30. LI Ruzhong. Research progress and trend analysis of water quality prediction theory model. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2006, 29(1): 26-30. (in Chinese)
- [6] 梁楠. 基于人工神经网络的水质预测及 MATLAB 实现[D]. 西安: 长安大学, 2007.

- LIANG Nan. Water quality prediction based on artificial neural network and MATLAB implementation. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [7] 金梦. 基于 WASP 水质模型的水环境容量计算[D]. 沈阳: 辽宁大学环境学院, 2011.
JIN Meng. Water environment capacity calculation based on WASP water quality model. Shenyang: School of Environment, Liaoning University, 2011. (in Chinese)
- [8] 于顺东. WASP 水质模型应用与 DO 模型评价[D]. 天津: 天津大学环境科学与工程学院, 2007.
YU Shundong. WASP water quality model application and DO model evaluation. Tianjin: School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [9] 张佩芳, 朱文杰, 任妍冰, 单璐. 基于 WASP7 模型的水质模拟应用以淮沭新河东海段为例[J]. 环境监控与预警, 2018, 10(02): 11-14.
ZHANG Peifang, ZHU Wenjie, REN Yibing and SHAN Wei. Application of water quality simulation based on WASP 7 model—Taking the east China sea section of Huaihe River as an example. Environmental Monitoring and Warning, 2018, 10(2):11-14. (in Chinese)
- [10] 唐国平, 陈德超, 黄振旭, 徐小峰. 基于 WASP 模型的水质模拟及参数敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 41-44+194.
TANG Guoping, CHEN Dechao, HUANG Zhenxu and XU Xiaofeng. Water quality simulation and parameter sensitivity analysis based on WASP model. International Journal Hydroelectric Energy, 2017, 35(5): 41-44+194. (in Chinese)
- [11] 徐斌, 杨悦锁, 王咏, 张刚, 范伟, 路莹, 高翠萍. 生态修复工程条件下污染河流水质模拟和应用[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2714-2722.
XU Bin, YANG Yuesuo, WANG Wei, ZHANG Gang, FAN Wei, LU Ying and GAO Cuiping. Simulation and application of polluted river water quality under ecological restoration engineering conditions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2714-2722. (in Chinese)
- [12] 何长宽, 宋宝生, 等. 桃林口水库一期工程对秦皇岛市城市用水的作用[J]. 河北水利水电技术, 1999(1): 24-25.
HE Changkuan, SONG Baosheng, et al. The effect of the first phase of Taolinkou Reservoir on urban water use in Qinhuangdao City. Hebei Water Resources and Hydropower Technology, 1999(1): 24-25. (in Chinese)
- [13] TORO, D. M., FITZPATRICK, J. J., THOMANN, R. V., et al. Documentation for water quality analysis simulation program (WASP) and model verification program (MVP). Process SPIE, 1983, 34(5): 4-10.
- [14] 王佳, 徐世宾, 郑溟. 桃林口水库水质调查分析与预测[J]. 水科学与工程学报, 2011(6): 23-27.
WANG Jia, XU Shibin and ZHENG Zheng. Analysis and prediction of water quality in Taolinkou Reservoir. Water Sciences and Engineering Technology, 2011(6): 23-27. (in Chinese)
- [15] 朱文博, 王洪秀, 柳翠, 张建, 梁爽. 河道曝气提升河流水质的 WASP 模型研究[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1326-1331.
ZHU Wenbo, WANG Hongxiu, LIU Cui, ZHANG Jian and LIANG Shuang. Study on WASP model of river aeration enhancing river water quality. Environmental Science, 2015, 36(4): 1326-1331. (in Chinese)