

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221707

基于 SWAT 模型的沂河流域氮负荷 时空分布及其关键来源研究

张国锐^{1a,1b}, 刘成高², 贾玉山², 吴挺峰³, 杨传国^{1a,1b}

(1. 河海大学 a. 水文水资源学院; b. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 连云港市石梁河水库管理处, 江苏 连云港 222300; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 为分析沂河流域氮污染负荷状况及变化, 建立 SWAT 模型, 基于临沂站监测数据进行模型率定, 分析流域污染时空分布特征并确定关键污染源。结果表明, SWAT 模型在沂河流域径流、污染负荷模拟研究中具有良好的适用性; 污染负荷年内主要集中在汛期(7~9月), 氨氮、总氮占全年的 73.34%、81.58%; 流域西南、东北干支流中下游子流域是污染负荷的主要来源区; 流域主要污染源为污水排放、农业施肥和土壤流失, 建议采取氮肥削减、退耕还林和综合治理措施以有效减少流域氮污染负荷。

关键词: 溶质模拟; SWAT 模型; 氮污染负荷; 关键来源; 沂河流域

中图分类号: X524; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0066-04

1 概况

沂河是淮河流域沂沭泗水系中最大的河流, 位于山东省南部与江苏省北部, 源自山东省沂源县, 向南流进江苏省后向东汇入黄海。流域地形西北高、向东南平原倾斜, 山丘占 70%, 平原占 30%, 属温带季风半湿润气候区, 多年平均降水量在 850 mm 左右。临沂站以上流域面积为 10 032 km², 区域人口密度大, 农业发达, 产业主要为制造业。根据国家监测中心数据, 临沂站监测断面主要污染指标为氨氮、化学需氧量, 污染处于中级水平, 是石梁河水库的主要污染源之一, 影响当地生产生活用水。因此, 本文针对沂河流域氮污染负荷状况及变化, 建立 SWAT 模型, 基于临沂站监测数据进行模型率定, 分析流域污染时空分布特征并确定关键污染源, 旨在为沂河流域氮污染防治提供指导建议。

2 研究数据和方法

2.1 数据来源

(1) 流域基础数据。研究区数字高程模型

(DEM) 采用 ASTER GDEM 数据, 网格分辨率约 90 m; 土地利用数据为 2010 年的土地利用 (GLC) 数据, 网格分辨率 30 m; 土壤数据来自世界土壤数据集 (HWSD), 网格分辨率 1 km。

(2) 水文气象数据。气象驱动数据为 SWAT 模型我国大气同化数据集 (CMADS) 2008~2016 年逐日数据^[1], 包括降水、气温、风速、太阳辐射和相对湿度, 由国家青藏高原科学数据中心 (tpdc.ac.cn) 下载。临沂站径流数据来自水利部历年水文年鉴。

(3) 水质数据。临沂站断面的水质数据摘录自我国环境监测总站发布的全国站点水质自动检测报告, 监测频次为周, 主要指标为氨氮 (NH₃-N) 和溶解氧 (DO)。

(4) 点源排放数据。点源废水排放数据主要依赖于临沂市重点企业排放月数据、山东省废水排放数据等^[2], 由临沂市生态环境局提供, 包括氨氮 (NH₃-N)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD) 等。

2.2 SWAT 模型

SWAT 模型是基于 GIS 的分布式水文模型, 包括水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型等, 可用于径流、泥沙、营养物运移的模拟。

收稿日期: 2022-08-17, 修回日期: 2022-09-26

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2021049)

作者简介: 张国锐 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: zgr9707@163.com

通讯作者: 杨传国 (1981-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水文水资源, E-mail: cgyang@hhu.edu.cn

模型计算的核心为水量平衡方程,计算公式为:

$$S_{SW_t} = S_{SW_0} + \sum_1^t (P_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中, S_{SW_t} 为时段末土壤含水率, mm; S_{SW_0} 为时段初始土壤含水率, mm; t 为时间步长, d; P_{day} 为第 i 天降水量, mm; Q_{surf} 为第 i 天地表径流, mm; E_a 为第 i 天蒸发量, mm; W_{seep} 为第 i 天土壤层侧向流量, mm; Q_{gw} 为第 i 天地下径流量, mm。

在有氧环境中,氮元素形态转化过程为有机氮到氨氮,然后到亚硝酸盐、硝酸盐。SWAT 模型河道水质计算采用 QUAL2E 模型,有机氮计算方程为:

$$\Delta\rho_{orgNstr} = (\alpha_1\rho_a\rho_{algle} - \beta_{N,3}\rho_{orgNstr} - \sigma_4\rho_{orgNstr}) T_T \quad (2)$$

式中, $\Delta\rho_{orgNstr}$ 为有机氮变化量, mg/L; α_1 为藻类生物中的氮含量, mg/mg; ρ_a 为藻类死亡速度, d^{-1} ; ρ_{algle} 为一天开始时藻类生物的含量, mg/L; $\beta_{N,3}$ 为有机氮转化为氨的速度常数, d^{-1} ; $\rho_{orgNstr}$ 为 1 天开始时有有机氮的含量, mg/L; σ_4 为有机氮的沉淀系数 d^{-1} ; T_T 为在该河段的运动时间, d。

氨氮计算公式为:

$$\Delta\rho_{NH_4str} = (\beta_{N,1}\rho_{NH_4str} - \sigma_3/(1000h) - f_{rNH_4}\alpha_1\mu_a\rho_{algle}) T_T \quad (3)$$

式中, $\Delta\rho_{NH_4str}$ 为氨氮变化量, mg/L; $\beta_{N,1}$ 为氨氮的氧化速度常数, d^{-1} ; ρ_{NH_4str} 为一天开始时的氨氮含量, mg/L; σ_3 为沉淀物的氨释放速度, $mg/(m^3 \cdot d)$; h 为河道水深, m; f_{rNH_4} 为藻类的氨氮吸收系数; μ_a 为当地藻类的生长速度, d^{-1} 。

基于 DEM 将沂河流域划分为 41 个子流域,根据土地利用、土壤及坡度分布特征,共划分为 230 个水文响应单元(HRU)。模型设置 2008 年为预热期,2009~2012 年为率定期,2013~2014 为验证期。基于先径流后水质的原则,采用 SWAT-CUP 软件进行模型参数率定,根据决定系数 R^2 、纳什系数 N_{NSE} 、相对误差 R_e 进行模拟结果评价^[3]。

2.3 污染源与评估

基于率定后的 SWAT 模型模拟输出各子流域的氨氮、总氮,计算各子流域单位面积污染负荷并绘制空间分布图,按照 ArcGIS 自然断点分级方法划分负荷等级。基于各子流域负荷等级,分析研究区氮负荷空间分布特征,并结合各子流域坡度、土地利用、施肥量、污水排放等,逐步分析流域污染关键源区。

采用基于站点数据和地理方法制作的氮沉降数据集^[4]计算研究区大气沉降输入。模型设置 3 种情况计算各污染源的贡献累计:①设置施肥量为 0;②设置点源输入水量不变,污染负荷为 0;③设置大气氮湿沉降为 0。分别单独设置各情景进行 SWAT 模拟,根据有无污染源输入的模拟结果差值,计算各污染源对氨氮总量的贡献率。

3 结果与分析

3.1 模型精度评价

经计算,逐月径流模拟结果的平均决定系数 R^2 为 0.90、纳什系数 N_{NSE} 为 0.90,相对误差为 3.86%,SWAT 模型能够准确模拟沂河临沂站径流过程(图 1(a))。断面监测水质指标氨氮(NH_3-N)和溶解氧(DO)模拟结果的平均决定系数 R^2 分别为 0.82、0.84,纳什系数 N_{NSE} 分别为 0.79、0.83,相对误差分别为 28.02%、6.43%,说明该模型能准确模拟沂河断面 NH_3-N (图 1(b)) 和 DO(图 1(c))的变化,丰水年 2009、2012 年和枯水年 2014 年具有较好精度,其余平水年精度略低。

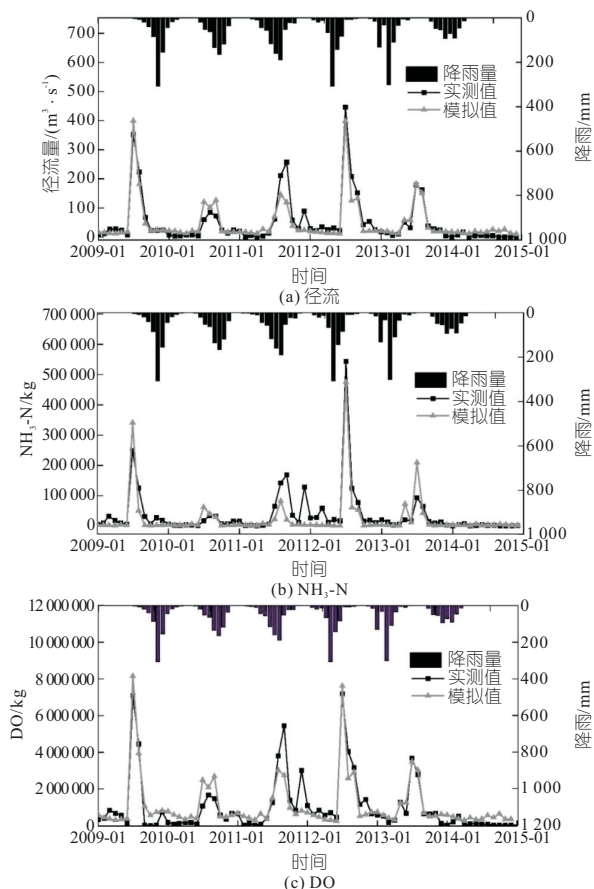


图 1 临沂站月监测指标模拟结果对比

Fig. 1 Comparison between the observed and simulation of Linyi Station

3.2 流域污染负荷输出特征

3.2.1 出口断面污染负荷年内变化

沂河径流年内丰枯悬殊,汛期为7~9月,其余月份可视为枯水期,图2为2009~2014年模拟的氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)月平均污染年内分布。NH₃-N多年月平均最大值出现在7月(185.62 t),其次为8月(46.78 t);TN多年月平均负荷同样集中在7、8月,平均值分别为832.41、226.59 t。

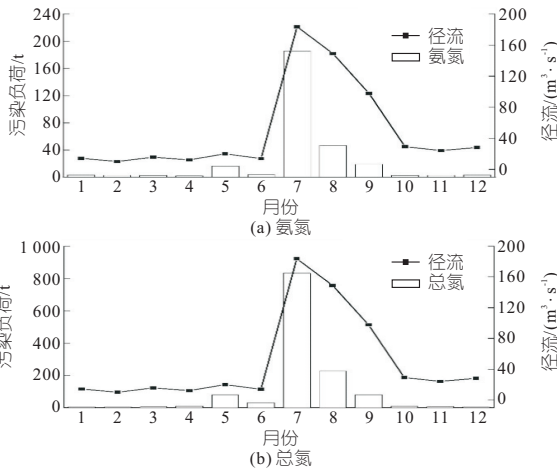


图2 多年月平均氨氮、总氮年内分布

Fig.2 Yearly distribution of monthly average ammonia nitrogen and total nitrogen

研究区汛期径流占全年的71.93%,同期NH₃-N、TN负荷占全年的73.34%、81.58%,7月为全年负荷最高的月份。随着汛期的结束,8、9、10月份负荷量呈下降趋势,5月份径流与平水期相近但负荷量较大,原因可能是作物耕种前施底肥所致。在此基础上计算年际径流与NH₃-N、TN的相关性,相关系数均高于0.9,说明流域污染负荷与降雨径流具有显著关系。直接原因是流域各地区高程相差较大,导致汛期土壤中的污染物易于流失,在暴雨情况下冲刷进入水体造成污染。因此,针对农业面源污染,合理调度避开汛期时段洪水进入石梁河水库是减少水库污染源的可行措施。

3.2.2 流域污染负荷空间产出规律

污染负荷等级划分见表1。在2009~2014年,污染物负荷主要产出于水系发达的中下游子流域(图3(a))。NH₃-N负荷较大的子流域有26、29、38、39、40、41,负荷等级高于V级;TN负荷较大的子流域为29、31、38、40、41,负荷等级高于V级。

表1 污染负荷等级划分

Tab.1 Pollution load classification kg/km²

污染负荷	I	II	III	IV	V	VI
NH ₃ -N	≤1	10	100	1 000	5 000	>5 000
TN	≤50	100	500	1 000	5 000	>5 000

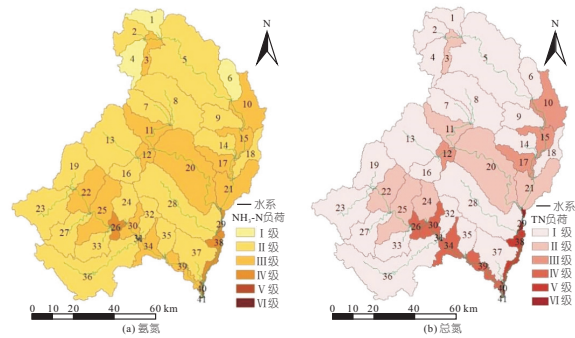


图3 单位面积氨氮、总氮空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ammonia nitrogen and total nitrogen per unit area

流域上游沂源、沂水县(子流域1~10)NH₃-N、TN负荷等级多为I~II级。这些子流域坡度大于10%,遭受暴雨冲刷强度大,土肥易流失。但流域上游地区子流域主要用地为草地,耕地面积低于30%,且点源排放较少,工业程度较低,主要污染来源为农业施肥,总量较小。

流域中游地区污染明显加重,沂南县(子流域11~20)面积相对较小、坡度低、农业用地占比高于40%且施肥超过5 000 kg/km²,人口密集,工业、生活废水排放较多,因此该区域负荷等级为III~V级,主要污染源为农业肥料、废水排放、土壤氮流失。支流沭河经过平邑、费县的下游区域(子流域22~38)及流域出口(子流域39~41)NH₃-N、TN负荷均超过IV级。除流域出口区域外主要用地均为耕地,河东、兰山区(子流域37、38、39)是点源排放的集中区域,出口子流域40、41承接上游土壤氮流失、排放污水、农业污染等,成为流域内氮污染最严重的区域。

综上所述,流域东北部分区域和西南部干支流中下游地区污染较高,原因是这些区域人口密集、农业发达,工业及生活废水排放量大进一步造成了严重的水体污染。表明流域污染负荷与地理因素、土地利用类型、人口及工业程度联系密切,因此可将该区域视为污染来源关键地区。

3.3 流域污染负荷来源解析

沂河流域控制面积超过10 000 km²,上下游高程起伏较大,易造成水土流失,土壤冲刷造成的氮流失较为严重。同时,流域中下游农业占比较大,兰山区、河东区、临沭县等地区人口众多、工业排放较大。因此,考虑主要污染来自农业污染、废水排放、土壤流失及大气氮沉降。通过设置有无污染源的模拟结果,估算各污染源对NH₃-N污染负荷的贡献。基于设置情景方案,利用SWAT模型对比计算流域农业、工业和大气沉降源氨氮

输出量(图 4),结果表明沂河流域对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷贡献量最大的为土壤氮流失占比 39.86%,污水排放、施肥分别贡献 33.08%、23.16%,大气氮沉降贡献量最小,为 3.9%。

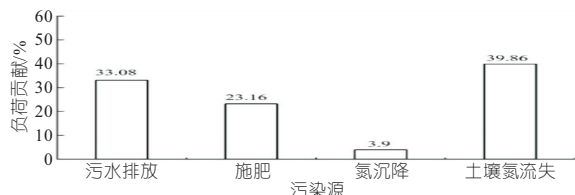


图 4 不同污染源的氨氮负荷贡献

Fig. 4 Contribution of ammonia nitrogen load from different pollution sources

经分析污染来源的主要贡献为土壤氮流失和污水排放,这与文献[5]模拟的结果类似,其中 TN 入库污染中土壤背景值贡献 18.6%,工业、生活废水排放占比为 51.4%。同时,SEBILO M 等[6]发现耕地施肥中的氮元素有 61%~65% 被植物吸收,未被利用的营养盐会残留在土壤中,解释了土壤受径流冲刷进入河道造成污染的原因。农田施肥一直是流域非点源污染的研究重点,文献[7,8]结果与本文相似。总的来说,沂河流域的主要污染源与以农业为主的小流域相似,但工业、生活废水排放的贡献率相对较高,来源构成更为复杂,需采取详细的削减措施。

3.4 污染负荷控制策略分析

图 5 为沂河流域 2010、2015、2020 年的土地利用分类图。统计表明研究区域主要用地为草地、耕地,各土地利用类型无明显变化,表明农业源污染变化较小。针对沂河流域汛期污染负荷大,以及各污染源的变化情况,可以合理安排施肥时间,有效减少污染负荷排放。对于农田施肥造成的非点源污染,可采取减量施氮从源头控制氮素流失,同时配合作物秸秆深埋、退耕还林可有效改善水环境[9]。山区林地需要加强水土保持、城市和村镇污水进一步加强处理效率、河湖周围设置缓冲带等措施进行综合治理负荷削减[10]。

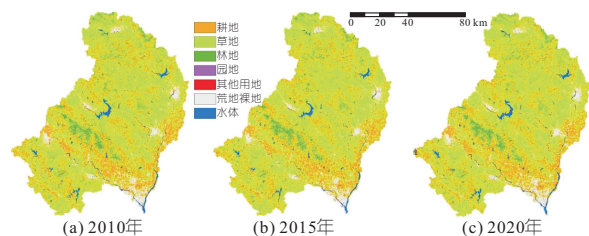


图 5 沂河流域土地利用变化情况

Fig. 5 Land use change in Yihe River Basin

a. SWAT 模型在沂河流域径流溶质模拟结果的平均 N_{NSE} 大于 0.8, R^2 大于 0.85, 相对误差较小,表明模型适用于研究区的径流、污染负荷模拟研究。

b. 从时间分布上看,污染负荷量分布与径流年内分布相同,汛期污染负荷 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 负荷最高占全年的 73.34%、81.58%,汛后径流氮污染浓度降低,说明降雨径流冲刷土壤、施肥残留是水体污染的主要原因之一。

c. 流域空间分布表现为西南和东北部分靠近水系的子流域负荷高,中下游靠近水系的子流域农业发达、污水排放量大,是点源排放的主要区域,可视为关键来源区。

d. 沂河流域污染主要来源为土壤氮流失(39.86%)、污水排放(33.08%)和农业施肥(23.16%),大气氮沉降变化较小,针对各污染源采取氮肥削减、退耕还林、增加污水处理效率和综合治理措施可有效削减氮污染。

参考文献:

- [1] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用——以黑河流域为例[J]. 人民珠江, 2016, 37(7): 1-19.
- [2] 刘艺,张郑贤,张锋贤,等. 近 15 年山东省水环境污染与经济发展关系研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(6): 414-422.
- [3] 王维刚,史海滨,李仙岳,等. 基于改进 SWAT 模型的灌溉—施肥—耕作对乌梁素河流域营养物负荷及作物产量的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1505-1523.
- [4] 贾彦龙,王秋凤,朱剑兴,等. 1996-2015 年中国大气无机氮湿沉降时空格局数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2019, 4(1): 8-17.
- [5] 林晓娟,黄津辉,林超,等. 岳城水库流域污染源模拟[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 74-79.
- [6] SEBILO M, MAYER B, NICOLARDOT B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [7] 于佩丹,张守红,李华林,等. 北沙河上游流域氮、磷污染风险空间分布特征解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 4-12.
- [8] 李舒,李家科,郝改瑞. 陕西省丹汉江流域非点源污染负荷估算及评价[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(增刊 2): 243-249.
- [9] 张万锋,杨树青,孙多强,等. 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 786-795.
- [10] 张耀方,常国梁,黄炳彬,等. 基于 SWAT 模型以北运河上游流域氮负荷削减为重点的山水林田湖草修复措施配置研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 13-22.

4 结论

Assessment of Flood Resources Utilization Potential in the Xizhijiang River Basin Based on SWAT Model

YANG Ji^{1a}, JU Xin-hui^{1a}, LI Li-qun², ZHOU Peng-cheng³, GONG Yi-qing^{1b}

(1a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; 1b. Institute of Water Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Changsha Water Conservancy Bureau, Changsha 410100, China; 3. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Scientific evaluation of flood resource utilization potential is an important prerequisite for carrying out flood resource utilization in the basin and alleviating the contradiction between supply and demand of water resources. To evaluate the potential of flood resource utilization in different sections of the Xizhijiang River Basin, the SWAT model was constructed to simulate the natural runoff process of Xizhijiang River Basin, and the flood resources of the basin were quantified by combining the limit analysis theory. The potential of flood resources utilization in the upper, middle and lower reaches of the basin was evaluated, and the feasibility of flood resources utilization in Xizhijiang River Basin was discussed based on the water quality conditions. The results show that the SWAT model has good applicability in runoff simulation of Xizhijiang River Basin; The inter-annual distribution of flood resources is uneven, and there are great differences in inter-annual flood resources utilization potentiality. The utilization condition of flood resources in the lower reaches is better than that in the upper reaches, while the utilization rate of flood resources in the lower reaches is lower. The average annual current and theoretical utilization potential of flood resources in the lower reaches are $3.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $7.97 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The water quality indexes of the main stream of Xizhijiang River Basin are not lower than the class III standard, and the utilization of flood resources in Xizhijiang River is feasible. This study can provide support for the optimal allocation of flood resources in Xizhijiang River Basin, and it has an important reference value for achievement of high quality development of the basin.

Key words: Xizhijiang River Basin; SWAT model; runoff simulation; flood resources utilization potential

(上接第 69 页)

Spatiotemporal Distribution Characteristics and Key Sources of Nitrogen in Yihe River Basin Based on SWAT Model

ZHANG Guo-rui^{1a,1b}, LIU Cheng-gao², JIA Yu-shan², WU Ting-feng³, YANG Chuan-guo^{1a,1b}

(1a. College of Hydrology and Water Resources; 1b. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shilianghe Reservoir Management Office, Lianyungang 222300, China; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to analyze the Nitrogen pollution status and changes in the Yihe River Basin, a SWAT model was established, and the model was calibrated based on the monitoring data of Linyi Station. Its temporal and spatial distribution characteristics were analyzed and the key pollution sources were identified. The results show that the SWAT model has good applicability in the simulation research of runoff and pollution in the Yihe River Basin; The pollution is mainly concentrated in the flood season from July to September, and the ammonia nitrogen and total nitrogen load account for 73.34% and 81.58% of the whole year; The sub-basin in the southwest and close to the water system in the northeast are the main source area of pollution; The main sources of pollution in the basin are sewage discharge, agricultural fertilization and soil loss. Taking Nitrogen fertilizer reduction, returning farmland to forest and comprehensive management measures for the changes can effectively reduce the discharge of pollution load.

Key words: solute simulation; SWAT model; Nitrogen pollution load; key sources; Yihe River Basin

(上接第 100 页)

Comparative Analysis of Wave Run-up of High Wave Wall Earth Rockfill Dam

YIN Jia-nan¹, ZHANG Yan-ze², YANG Hai-tao¹, WANG Sheng-li², CAO Yu-long³

(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China;
2. Inner Mongolia Water Investment Group Co., Ltd., Hohhot 010020, China;
3. Inner Mongolia Yin Cao Ji Liao Water Supply Co., Ltd., Hinggan League 137699, China)

Abstract: In view of the case that the high wave wall changes from inclined to vertical near the dam slope and crest, numerical simulation and physical model tests were used to mutually verify the calculation of wave run-up. The working conditions of different wave elements and water depth in front of the dam were analyzed to study the impact of high wave walls on wave run-up in the reservoir. The results show that when the same wave factor is applied to different reservoir depths, the wave run-up shows an inverted parabolic trend with the reservoir depth; The maximum wave run-up occurs at the intersection of the vertical section of the wave wall and the slope section; When the water depth in front of the wall is higher than the intersection of the vertical section and the slope section, the wave run-up calculated by the standard method is larger compared with the results of mathematical and physical models. The finding can provide a reference for the refined design of the top elevation of high wave walls considering the impact of wave run-up in the design of earth-rockfill dam.

Key words: high wave wall earth rockfill dam; wave run-up; normative law; numerical physical model test