

郓城南湖雨水径流悬浮物削减方案研究

尚福强¹, 蔡一², 王硕¹, 唐莉华², 孔彬¹, 王树磊³

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100084; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084;
3. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 雨水径流对城市湖泊水体环境质量有显著影响。针对雨水径流中泥沙含量过高的问题, 为设计山东省郓城县南湖入湖雨水径流悬浮物削减方案, 开展了水力旋流器对雨水径流中悬浮物去除效果及影响因素的实验研究。实验结果显示: 水力旋流器对于悬浮物的分离效率随着进料浓度的增大而降低; 随着进料流量的增大而提高, 且进料流量可以更显著地影响水力旋流器的分离效率。基于实验结果, 拟合得到相应型号的水力旋流器分离效率、进料浓度和进料流量之间的回归关系, 并预估了在郓城南湖的实际应用中, 该型号水力旋流器对雨水径流中悬浮物的分离效率约为 26.63%, 需通过多级水力旋流器的串联或结合其他处理措施才能使入湖径流达到预设标准。

关键词: 雨水径流; 悬浮物削减; 水力旋流器; 城市景观水体; 固液分离; 分离效率; 郓城南湖
中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)02-0045-05

Removal scheme of suspended solids in rainwater runoff of Nanhu Lake, Yuncheng County

SHANG Fuqiang¹, CAI Yi², WANG Shuo¹, TANG Lihua², KONG Bin¹, WANG Shulei³

(1. PowerChina Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Rainwater runoff has a significant impact on the environmental quality of urban scenic water bodies. Aiming at the sediment load pollution of rainwater runoff in Nanhu Lake, Yuncheng County, Shandong Province, a hydrocyclone experiment was carried out in laboratory to study the removal effect of the suspended solids and its influencing factors in the initial rainwater runoff. The results show that the separation efficiency of the hydrocyclone decreases with the increase of the feed concentration but increases with the increase of the feed flow. According to the test results, the regression relationship between the separation efficiency, feed concentration and feed flow of a certain kind of hydrocyclone was fitted. Based on the actual situation of Nanhu Lake, the separation efficiency of this hydrocyclone on suspended solids is estimated to be about 26.63%, so it is necessary to combine multi-stage hydrocyclones or take other treatment measures to make the inflow runoff of the lake reach the preset standard.

Key words: rainwater runoff; suspended solids reduction; hydrocyclone; urban scenic water body; solid-liquid separation; separation efficiency; Nanhu Lake of Yuncheng

1 研究背景

由于初始冲刷效应的存在, 城市初期雨水径流中往往携带有大量固体悬浮物质(SS)^[1]。SS除自身作为一种污染物之外, 其对水体的影响更体现在其可以作为载体, 通过吸附、富集污染物发生生物化

学作用, 从而引发各类水质问题。研究表明, 雨水径流中的SS含量与总磷(TP)^[2]和化学需氧量(COD)^[3]之间存在着明显的正相关关系。同时由于SS对于氨氮^[4]和重金属等^[5]也表现出了较强的吸附作用, 因此水体中的SS浓度可显著影响氨氮与重金属的含量。由此可见, 控制水体中的SS浓度能

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-10-21

作者简介: 尚福强(1972-), 男, 陕西安康人, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为建设工程项目管理。

通讯作者: 唐莉华(1975-), 女, 重庆人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流域水文循环机理及模拟、土壤侵蚀及面源污染、流域水环境保护与评价。

够有效地削减各类污染物含量。

对于初期雨水中的SS,一般采用“沉淀—过滤”的手段进行去除^[6]。但此方法通常需要兴建大量配套设施,效率低且成本高。此外,也有通过引入黄花鸢^[7]、香蒲^[8]等湿地植物进行城市水体特别是雨水径流治理的尝试^[9],这类方法往往具有生态与景观效果兼顾的优势,但前期投入多、占地面积大、见效慢。相比之下,水力旋流器作为一种新兴的分离设备,由于其造价低、设备构造简单、处理效率高且无需额外占用土地^[10],近年来得到了广泛的重视与应用。尤其在城镇地区,因可用土地面积的限制,往往不具备采用沉淀法或湿地植物法的条件,因此旋流分离法就体现出了它的优势。

针对郓城南湖降雨径流中含沙量高的污染特点,拟采用水力旋流分离技术,对入湖悬浮物与泥沙进行拦截。因此本文开展了关于水力旋流器在不同进料浓度、不同进料流量条件组合下工作效率的研究,寻找适合于南湖水体的有效旋流器参数,并对旋流分离技术效果进行预评估,为实现对该地区雨水中污染物的控制和综合处理提供参考。

2 研究区概况

郓城南湖(下称南湖)位于山东省菏泽市郓城县中心城区南部,主要作为当地城镇景观水体。南湖本身无其他水源补充,水流速度缓慢,属于典型的城市封闭缓流景观水体,自净能力十分有限。加之周边 2.2 km² 范围内的雨水径流经过雨水管网汇集入湖(雨水管分布如图 1 所示),入湖雨水携带了较多的污染物质^[11],造成南湖水体污染。2018 年 6 月 28 日对采集到的湖水水样以及雨水管水样进行了水质检测,发现 COD 和 TN 浓度超标较为明显(执行地表水 IV 类水标准)。各雨水管水质检测结果见表 1。

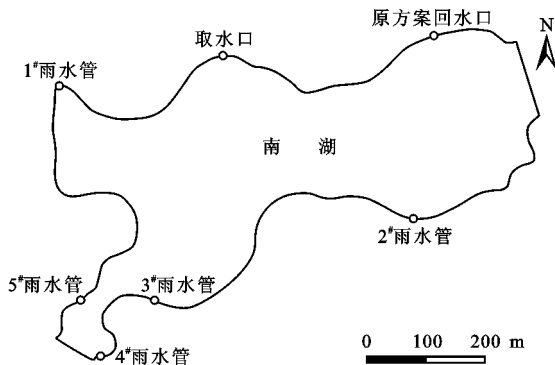


图 1 南湖雨水管与水源热泵取水口、回水口分布

表 1 南湖各雨水管水质检测结果 mg/L

污染物	1#雨水管	2#雨水管	3#~5#雨水管
SS	481	121	154
TP	0.21	0.16	0.21
NH ₃ -N	1.83	2.54	1.22
COD	145	60.2	106
TN	3.19	3.81	2.42

根据表 1 中南湖各雨水管水质检测结果,该地区初期雨水径流中的悬浮物浓度范围为 120 ~ 500 mg/L,超出国家污水排放标准^[12]中规定的 SS 最高允许排放浓度(50 mg/L)。同时还可以看出,雨水径流中 SS 和 COD 具有较强的相关性,因此拟通过控制入湖雨水径流的悬浮物浓度,达到削减入湖 COD 负荷的效果,从而改善南湖的湖水水质。

3 研究方法及实验设置

3.1 水力旋流器工作原理

水力旋流器的工作原理主要是离心沉降作用,其结构示意图见图 2。

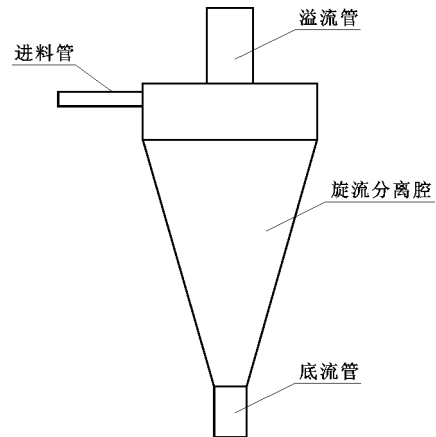


图 2 水力旋流器结构示意图

由于固液两相的密度差异,两者受到的离心力、向心浮力与流体曳力也不同,从而可以实现固液分离。一部分固相物质由于密度较大,凭借重力沉降而从底流管排出;经过分离后的清液则从仪器上部溢流管流出。层流状态下的斯托克斯公式见公式(1),由公式(1)可知,在高速的离心旋转运动中,由于颗粒切向运动速度 v 可以用增加进料速度而提高,因此采用旋流器可以更好地分离由于颗粒过细而难以通过重力沉降去除的小微粒^[13]。

$$v_0 = \frac{d^2 v^2 (\rho - \rho_s)}{18r\mu} \quad (1)$$

式中: v_0 为颗粒的沉降速度, m/s ; d 为球形固体颗粒直径, m ; ρ_s 为固体颗粒密度, kg/m^3 ; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; μ 为介质动力黏度, $Pa \cdot s$; r 为颗粒运动旋转半径, m ; v 为颗粒切向运动速度, m/s 。

3.2 分离效率及其影响因素

旋流器的工作效率主要体现为分离效率,即固液混合液经过旋流器后固体颗粒从混合液中脱离的程度。实验采用从底流管中排出的固体颗粒占从进料管进入旋流器的固体颗粒的质量百分比作为旋流器的分离效率,其计算公式为:

$$E = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E 为旋流器的工作效率,即分离效率,%; m 为从底流管中排出的固体颗粒质量, g ; M 为旋流器工作期间从进料管进入旋流器的固体颗粒质量, g 。

根据庞学诗^[14]的研究,水力旋流器的分离效率主要受旋流器直径、底流管直径、溢流管直径等结构参数及进口压力、给料浓度、给料流量等操作参数共同决定。

由于进料浓度与进料流量的地区差异性较大,本次实验主要针对南湖雨水管雨水径流的实际情况,研究水力旋流器在当地应用中的进料浓度、进料流量与分离效率的关系。

3.3 实验装置与参数选择

决定实验装置的关键在于确定旋流器的技术规格(内径),可以通过旋流器的生产能力(即入流流量),依据经验关系确定^[10]。考虑到设备安装后需要具有全年正常工作的能力,因此在实验设备选型时应满足最大生产能力即最大雨水管流量的情况。由于实验场地等条件限制,无法安装过大的仪器设备,选择含沙量与生产能力均较小的 4 号管(生产能力 $6.45 m^3/h$, SS 浓度 $154 mg/L$)进行实验。根据 2018 年郟城降雨资料,选择降雨量最大的 8 月份对应的雨水管流量作为实验设备的选型依据。为保证实际工作中设备的运行安全,选型时适当扩大各管流量,取安全系数为 1.2。

参考南湖水体的最大日径流量、入湖径流的日均 SS 浓度以及水力旋流器的技术参数关系,选择 FX-100 型水力旋流器,其基本参数如表 2 所示。

表 2 FX-100 水力旋流器基本参数

内径/ mm	进料口 直径/mm	溢流口 直径/mm	仪器高/ mm	生产能力范围/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)
100	30	40	550	5~12

实验装置示意图见图 3。按照实验方案 SS 浓度要求,将一定量的泥沙与自来水混合加入水箱并充分搅拌。考虑到自然条件下泥沙粒径组成比较复杂,且本次研究不讨论泥沙颗粒粒径与分离效率之间的关系,实验中仅筛除粒径大于 $1.18 mm$ 的大颗粒,保留其他各种粒径的泥沙进行实验。用该混合液模拟自然条件下的雨水径流,后通过潜水泵加压使混合液通过电磁流量计进入水力旋流器。实验过程中可以通过阀门控制进入旋流器的流量。待旋流器分离完成后回收自底流管排出的富含泥沙的底流。待其自然干燥后使用电子天平称量获得经旋流器过滤出的泥沙重量。从进料口进入的泥沙重量则根据过流时间、泥沙浓度与进料流量计算得到。

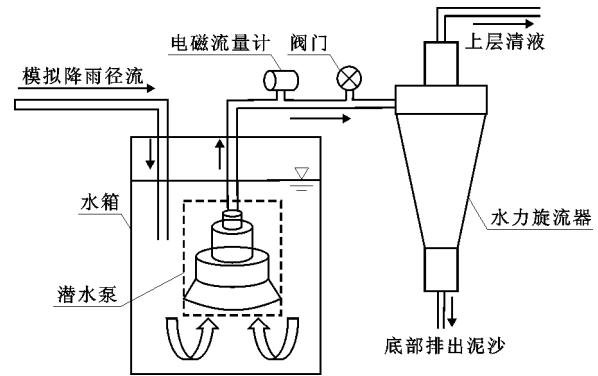


图 3 实验装置示意图

3.4 实验方案设计

确定实验装置后,根据南湖雨水管口出水悬浮物浓度与 FX-100 水力旋流器的工作条件,制定如表 3 所示的两组实验方案。

表 3 实验设计方案

过流时 间/min	实验 1		实验 2	
	进料浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$)	进料流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	进料浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$)	进料流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)
		6		100
		7		150
5	100	8	8	200
		9		300
				400

4 结果与分析

4.1 进料流量的影响

图 4 为进料浓度为 $100 mg/L$ 、进料流量为 $6 \sim 9 m^3/h$ 时的实验结果。通过公式(2)可计算得到不

同实验方案下旋流器的分离效率。

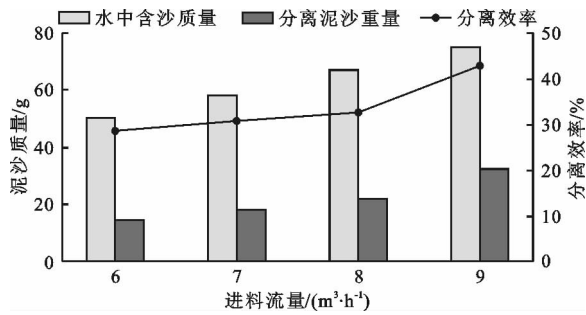


图4 不同进料流量下旋流器分离泥沙情况及效率曲线

由图4可以看出,在进料浓度一定的情况下,进料流量越大,分离效率越高。因为当进料流量增加时,旋流分离腔入口的流速也增大,使混合液在旋流分离腔中的切向加速度增大,从而导致离心力的增强,使得混合液中的固体颗粒能够被更好地分离。根据袁惠新等^[15]关于水力旋流器在水油分离方面应用的研究结果,当进料流量进一步增加时,分离效率将稳定在一个较高的水平。矫学成等^[16]认为这是由于旋流器工作时分离腔内存在空气柱,随着进料流量的增加上升流也随之增大,使得已经聚集在底流管附近的颗粒被重新卷起,影响了分离效率。在极端情况下,单纯继续增加进料流量难以进一步提高分离效率,反而会使底流管堵塞,影响旋流器的正常工作。在实验过程中,当进料流量从8 m³/h增大到9 m³/h时,分离效率的提高最为显著,最大分离效率超过40%。

4.2 进料浓度的影响

图5为进料流量为8 m³/h、进料浓度为100~400 mg/L时的实验结果。通过公式(2)可计算得到不同实验方案下旋流器的分离效率。

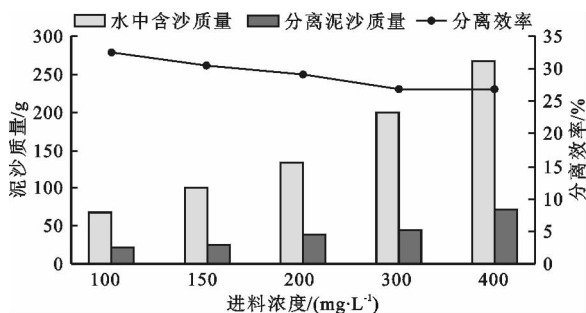


图5 不同进料浓度下旋流器分离泥沙情况及效率曲线

由图5可以看出,当进料流量一定时,随着进料浓度的增加,旋流器的分离效率降低。这主要是因为进料浓度越大,则颗粒之间的相互作用越强,导致分离效率降低;同时混合液的黏度也会增加,其运动

过程中受到的阻力同步增大,离心效果减弱,最终导致分离效果下降。进料浓度从100 mg/L到400 mg/L的变化过程中,分离效率的降低比较平稳且降低幅度不大,约减少5.7%。说明在这一区间内浓度对效率的减弱效果不明显。

5 南湖雨水径流SS削减方案讨论

在旋流器的分离过程中,某一颗粒的沉降速度越大,则该颗粒越容易沉降,即该颗粒被分离的概率越高。根据泥沙颗粒的沉降速度公式(公式(1))可知,颗粒切向运动速度越大、混合液黏度越低,则颗粒沉降速度越大,越容易被分离,即被分离效率越高。这一分析结论与实验得到的结果相符,因此认为实验结论可靠。

根据实验结果进行回归分析,得到FX-100型水力旋流器分离效率与进料浓度及进料流量满足方程式(3)的回归关系:

$$E = -0.03318con + 4.07972flu + 5.39890 \quad (3)$$

式中: E 为旋流器分离效率,%; con 为旋流器进料浓度,mg/L; flu 为旋流器进料流量,m³/h。

回归方程式(3)的确定系数(R^2)为0.7721,拟合效果较好。回归关系的弃真概率为0.02481,小于0.05,该模型的置信度达到95%以上,认为结果可信。方程式(3)中变量的回归系数进一步说明,旋流器的分离效率随进料浓度的增大而降低且随进料流量的增大而增大,在实验条件下,进料流量的改变对于旋流器分离效率的影响程度明显大于进料浓度变化对分离效率的影响,即分离效率对于进料流量的敏感性更高。

根据南湖4#雨水管的工作情况(流量与含沙量),代入方程式(3)可估算出采用FX-100水力旋流器对泥沙与悬浮物的分离效率约为26.63%。经过1级水力旋流器处理后的雨水径流SS浓度可从154 mg/L减小为112 mg/L,但仍然超过50 mg/L的排放阈值要求,可见只通过单台旋流器的处理尚不能满足规范要求。因此考虑通过串联多台旋流器的方式实现雨水径流的达标排放。经过计算,要使得4#雨水管的悬浮物排放达标,需要串联4台旋流器,处理后SS浓度约为43.7 mg/L。

对于其他几个雨水管,根据不同雨水管的SS浓度和平均日径流流量,需选择不同型号的水力旋流器(见表4)。由于水力旋流器的内径越大则颗粒的切向速度越快,使得更多质量较小的固相颗粒可以

完成沉降分离,即达到更高的分离效率^[17],因此可以认为内径更大的 FX-150~FX-600 型水力旋流器的分离效率将会高于 FX-100 型的分离效率。此外,通过实验总结出的规律:生产能力越大则分离效率越高,且进料流量对结果的敏感性更高,因此对于流量更大的其他几个雨水管,采用相应型号水力旋流器的分离效率应当高于 26.63%。

表 4 南湖 1[#]~3[#]及 5[#]雨水管的旋流器选型

雨水管 编号	生产能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	SS 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	旋流器选型
1 [#]	314.52	121	FX-600
2 [#]	25.81	481	FX-150
3 [#]	24.19	154	FX-150
5 [#]	104.84	154	FX-355

对于超标程度不严重的雨水径流,可以采用较少数量的水力旋流器串联,削减南湖雨水管中 SS 浓度,从而实现排放达标。但对于雨水径流 SS 浓度过大的情况(如 2[#]雨水管),单纯采用水力旋流器进行悬浮物消减,则需要串联较多台数的旋流器,这样会使得其经济性和便捷性的优势不明显,因此需要考虑与其他治理手段的联合使用,例如采用新式双锥-内锥型水力旋流器提高分离效率^[18];同时可以考虑结合人工湿地^[19-20]、土壤过滤系统^[21]、生物慢滤^[22]等措施,通过生态措施在雨水径流入湖之前对污染物进行处理,减少入湖污染负荷,从而最大程度地保障南湖水体的水环境质量。

6 结 论

由于雨水径流中的 SS 浓度与污染物浓度密切相关,因此以分离 SS 为目标的水力旋流分离器可应用于雨水径流的污染削减。本文结合郟城南湖实际情况,通过实验测试了水力旋流器的分离效率及影响因素。主要结论如下:

(1)根据不同方案的实验结果,分析了旋流器分离效率的主要影响因素(进料浓度、进料流量)对其具体的影响效果,即提高进料速度与离心力可以增大进料流量,从而显著提高旋流器的分离效率;增大进料浓度将会加大混合液的黏度,使颗粒难以沉降,从而降低分离效率。分离效率对于进料流量的敏感性更高。

(2)基于实验结果拟合得到了 FX-100 型旋流器分离效率与进料浓度、进料流量之间的回归方程,

并根据南湖 4[#]雨水管的实际情况计算得出了采用 FX-100 型水力旋流器处理悬浮物的分离效率约为 26.63%。可通过 4 台水力旋流器串联的方式使得雨水径流满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》的要求。

(3)根据南湖实际雨水径流量及水质状况,对其他几个雨水管的水力旋流器处理方案进行了初步选型。同时还需要指出,在污染水平较高的情况下,水力旋流器的单一作用有限,可以采用多级水力旋流器串联,或结合生态措施提高对径流污染的去除效果。

参考文献:

- [1] 任玉芬,王效科,欧阳志云,等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J]. 环境科学,2013,34(1):373-378.
- [2] 王华,吴佳,冯文波,等. 滇池及流域环境水中磷与悬浮物的相关性分析[J]. 环境科学与技术,2015,38(5):84-89.
- [3] 黄勇强,厉晶晶,杨飏. 镇江市雨水径流水质分析与旋流分离处理技术试验研究[J]. 工业安全与环保,2010,36(7):7-9.
- [4] 吕克仙. 不同环境水体中悬浮物与氨氮含量的相关性分析[J]. 资源节约与环保,2015(2):72+77.
- [5] 潘青山. 水中总悬浮物与溶解态重金属浓度关系的研究——以莆田市三江口河水为例[J]. 海峡科学,2019(2):16-21.
- [6] 胡强. 城市生活污水中的污染物分类及处理探析[J]. 环境与发展,2018,30(10):72-73.
- [7] 王盼,马牧源,刘春光,等. 不同氮源对黄花鸢尾净化富营养化水体的影响[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):13-17.
- [8] 王颖,马凡凡,侯迪,等. 香蒲净化不同浓度梯度水体的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):209-211.
- [9] 纪桂霞,蒙勇翔,许春蕾,等. 湿地植物对城市雨水径流污染的净化效能与适应性研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):203-206.
- [10] 隋元伟,董强,宁朋歌. 水力旋流器数值模拟参数的基础研究[J]. 合肥学院学报(综合版),2019,36(2):51-55+62.
- [11] 荆红卫,华蕾,陈圆圆,等. 城市雨水管网降雨径流污染特征及对受纳水体水质的影响[J]. 环境化学,2012,31(2):208-215.
- [12] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

(下转第 57 页)

- 改造小区径流控制效果的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(1): 50-56.
- [11] 伍雯臻,李榜晏,马越. 沔西新城海绵城市规划建设浅析[J]. 华中建筑, 2018, 36(3): 88-91.
- [12] 李宇超. 海绵城市建设的理论与实践[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2016.
- [13] 马越,姬国强,石战航,等. 西咸新区沔西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造[J]. 给水排水, 2017, 53(3): 59-67.
- [14] 刘力,侯精明,李家科,等. 西咸新区海绵城市建设对中型降雨致涝影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 155-159.
- [15] 陈光照,侯精明,张阳维,等. 西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 37-45.
- [16] 姚原,顾正华,李云,等. 森林覆盖率变化对流域洪水特性影响的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 9-15.
- [17] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49.
- [18] 龚佳辉,侯精明,薛阳,等. 城市雨洪过程模拟 GPU 加速计算效率研究[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 164-169+175.
- [19] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 96-107.
- [20] 李东来,侯精明,王新宏,等. 河床冲淤对洪水演进影响数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(5): 13-20.
- [21] OVERTON D E, BRAKENSIEK D L. A kinematic model of surface runoff response [C] // In Proceedings of the Wellington Symposium, Paris: Unesco/IAHS, 1970.
- [22] HOU Jingming, GUO Kaihua, LIU Feifei, et al. Assessing slope forest effect on flood process caused by a short-duration storm in a small catchment[J]. Water, 2018, 10(9): 1256.
- [23] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对沔河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 47-52.
- [24] 玛哈沙提·哈孜哈力,努尔夏西·曼斯尔. 天然河道的糙率确定方法分析[J]. 能源与节能, 2017(4): 94-95.
- [25] 潘景辰. 沔河西咸新区段防洪规划设计研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2018.
- [26] SMITH L S, LIANG Qihua. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 334-343.
- [27] HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment[J]. Advances in Water Resources, 2013, 52(2): 107-131.
- [28] HOU Jingming, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2013, 257: 126-149.

(上接第49页)

- [13] 覃殿归. 浅谈水力旋流器工作原理及影响因素[J]. 企业科技与发展, 2020(6): 36-38.
- [14] 庞学诗. 水力旋流器理论与应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.
- [15] 袁惠新,于晓辉. 旋流器中最佳操作参数的研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(3): 95-97.
- [16] 矫学成,王贵林,张勇,等. 液体旋流分离器分离效率的研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(5): 139-144.
- [17] 楚小飞. 水力旋流器结构尺寸对分离效率的影响分析[J]. 时代农机, 2011, 38(3): 46-46.
- [18] 陈浩,吴文科,吕斌,等. 用双锥-内锥型水力旋流器提纯海洋天然气水合物浆体[J]. 过程工程学报, 2018, 18(3): 491-495.
- [19] 刘霄,黄岁樑,唐婷芳子,等. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5): 1-5.
- [20] 刘霄,黄岁樑,刘学功. 三种人工湿地填料对磷的吸附特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 16-19.
- [21] 李丹,王欣泽,刘剑楠,等. 多级土壤渗滤系统填料的脱氮除磷性能研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(10): 24-29.
- [22] 许光远,徐志嫻,苏振铎,等. 生物慢滤池用于污水深度处理的实验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 186-189.