

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.251

基于 FLUENT 的截污干渠设计参数对末端 TP 质量浓度的影响

曾祥平^{1a,1b}, 付楠楠^{1a,1b}, 丁文川^{1a,1b}, 唐鑫如^{1a,1b}, 吴思^{1a,1b},
曾晓岚^{1a,1b}, 张玉², 罗万申²

(1. 重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045;
2. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 成都 610081)

摘要: 滇池环湖截污干渠在输运农村农业面源污水时, TP 质量浓度会沿程降低且在截污干渠末端低于水质净化厂设计进水质量浓度, 导致水厂 TP 无法达标排放。为探究截污干渠主要设计参数对输运末端农村农业面源 TP 质量浓度的影响, 为截污干渠设计提供技术参考, 研究针对建设完善的滇池东岸截污干渠所运输的农村农业面源污水, 以颗粒态磷为主要对象, 利用 FLUENT 三维模拟软件构建了滇池东岸截污干渠流体的多相流模型并进行流动过程的模拟, 分析了截面形状、粗糙度、水力直径、坡度等主要设计参数对干渠末端出口 TP 质量浓度的影响。结果表明, 末端 TP 质量浓度圆形截面最低, 梯形最高; 末端出口 TP 质量浓度随粗糙度增大均升高; 随水力直径或坡度的增大, 矩形及梯形截面的末端出口 TP 质量浓度增加或降低, 圆形截面则总体降低或变化不大。

关键词: TP 质量浓度; 农村农业面源; 截污干渠; 设计参数; 多相流数值模拟

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1000-582X(2024)12-024-11

Influence of FLUENT-based design parameters of sewage interception trunk on total phosphorus concentration at the trunk endpoint

ZENG Xiangping^{1a,1b}, FU Nannan^{1a,1b}, DING Wenchuan^{1a,1b}, TANG Xinru^{1a,1b}, WU Si^{1a,1b},
ZENG Xiaolan^{1a,1b}, ZHANG Yu², LUO Wanshen²

(1a. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment Under Ministry of Education;
1b. Low Carbon Green Building International Joint Research Center, Chongqing University, Chongqing 400045,
P. R. China; 2. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, P. R. China)

Abstract: As agricultural non-point source runoff is transported to a wastewater treatment plant by the sewage interception trunk around Dianchi Lake, the total phosphorus(TP) concentration decreases along the way, often falling below the designed influent concentration at the trunk's endpoint. This reduction can result in non-compliance with discharge standards. To explore the influence of key design parameters on endpoint TP concentration and provide technical guidance for sewage interception trunk design, this study focuses on granular phosphorus from agricultural runoff transported by a well-designed sewage interception trunk on the eastern bank

收稿日期: 2023-06-25 网络出版日期: 2024-09-10

基金项目: 重庆大学大型仪器设备开放基金项目(202303150125)。

Supported by the Open Fund Project for Large-scale Instrument of Chongqing University(202303150125).

作者简介: 曾祥平(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水污染处理方向研究, (E-mail)zengxp7@163.com。

通信作者: 曾晓岚, 女, 副教授, 博士生导师, (E-mail)wendyzeng@cqu.edu.cn。

of Dianchi Lake. Using the three-dimensional simulation software FLUENT, a multiphase flow model was constructed to stimulate the fluid flow process within the trunk. The influences of section shape, roughness, hydraulic diameter, and slope on the endpoint TP concentration were analyzed. Results show that the endpoint TP concentration is lowest for circular cross sections and highest for trapezoidal sections. As roughness increases, TP concentration rises across all section shapes, with the smallest variation range in rectangular sections, and the largest in circular sections. Increasing hydraulic diameter or slope results in increased or decreased TP concentration for rectangular or trapezoidal sections, while in circular sections, TP concentration either decreases or shows minimal change.

Keywords: total phosphorus; agricultural runoff; interception trunk canal; design parameters; multiphase flow numerical simulation

滇池是中国著名的高原淡水湖泊,被国务院列为重点治理的“三湖三河”之一^[1]。经过 30 a 的不断治理,滇池的水污染恶化趋势得到了遏制,但水质常年维持在中度或重度富营养化状态^[2],目前仍属 5 类重污染湖泊^[3]。为了防治滇池富营养化,中央政府及昆明市等部门在滇池流域构建起了从源头控制到末端截污的环湖截污治污工程体系^[1],分为北岸、东岸、南岸和西岸 4 个片区。其中,环湖东岸的截污系统基本完善,对削减入湖污染负荷、改善滇池水体环境发挥了显著作用。目前除北岸外,其余片区均以农灌沟渠收集农村农业面源为主,并通过沟渠末端的高效截留井将高浓度部分截留进入环湖截污干渠,再经由截污干渠输送至末端混合水质净化厂达标处理后排放。

通常情况下,为保证过水能力、方便维护保养,污水管道设计时需要选择适当的水力学参数,如管道坡度、断面形状和粗糙度等,从而实现污水和部分固体污染物的高效输送。现有研究表明^[4]:在输送污水的过程中,管渠本身对污染物也具有一定的降解能力和效果,其末端出口处即污水处理厂进口处的水质将影响污水处理工艺的运行调控,进而影响出水水质。“管网协同污水处理厂共同处理”的新模式正在逐渐取代“末端污水处理厂处理”的传统模式。滇池流域截污干渠自 2012 年开始投入运行,其设计参数的选择并未考虑管渠本身对污染物的去除能力。该截污干渠输送的农村农业面源污水,含有大量悬浮颗粒,其中颗粒态总磷 (total phosphorus, TP) 占比较大。魏婷^[5]对环湖东岸截污治污体系的研究发现,截污干渠输送的农业面源污水至其末端进入混合水质净化厂时的 TP 质量浓度低于该厂的进水设计指标值;而东岸混合水质净化厂 MBR 工艺在运行参数进行优化调控后,处理出水除 TP 以外的其他污染指标都能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准^[6]。

报道表明水体中磷浓度与富营养化藻类生物量之间呈正相关性,磷被公认为是有害藻类形成“水华”种群和密度的第一限制性营养因素^[7-8]。戴丽等^[9]研究指出大规模种植花卉蔬菜施加过量磷肥加剧了滇池流域农村农业面源污染,致使滇池富营养化污染加重;徐晓梅等^[10]发现防止滇池富营养化程度加重,对湖泊富营养化主要限制因子及农村农业面源污染中占比最大的污染物 TP 的控制尤其重要。考虑到滇池流域降雨径流中的 TP 主要以颗粒态为主^[11-12],其随泥沙和悬浮物进入干渠^[5]后在运输过程中会发生沉降^[13],而干渠坡度、断面形状、水力条件等因素是影响沉积物负荷的主要因素^[14],为充分发挥截污干渠与混合水质净化厂的协同作用,进一步控制滇池富营养化,针对建设完善的滇池东岸截污干渠,以颗粒态 TP 为主要对象,利用模拟流体运动过程的计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) FLUENT 软件,构建多相流模型以探究不同截面形状、粗糙度、水力直径、坡度等主要设计参数对干渠末端出口 TP 质量浓度的影响,揭示截污干渠主要设计参数与污水厂进水水质之间的相互关系。研究成果不仅对实现滇池面源污染的控制具有重要意义,还可为类似截污干渠设计参数的选择、干渠末端污水厂处理工艺的调控与选择提供依据。

1 FLUENT 模型参数选择与验证

1.1 截污干渠概况

研究对象为新宝象河至洛龙河污水厂段的滇池东岸截污干渠,长 2 500 m,深 4.5 m,宽 4.5 m,平均坡度 0.3‰,粗糙度 1.2 mm。在截污干渠起端设置监测点 0,根据研究区域内不同土地利用类型以及进入截污干渠

水质的不同,在以河道污水为主处设置监测点1、以农村生活污水为主处设置监测点2,以农业面源污染为主处设置监测点3,截污干渠末端最后一个通气井处设置监测点4。研究区域截污干渠及监测点分布如图1所示。利用FLUENT软件对该段干渠进行模拟的几何模型如图2所示。由图2可知,截污干渠在监测点3前后弯曲度出现明显变化,呈现一定的弧度。



图1 研究区域截污干渠及监测点分布图

Fig. 1 Distribution map of main sewage interception canal and monitoring points in the study area

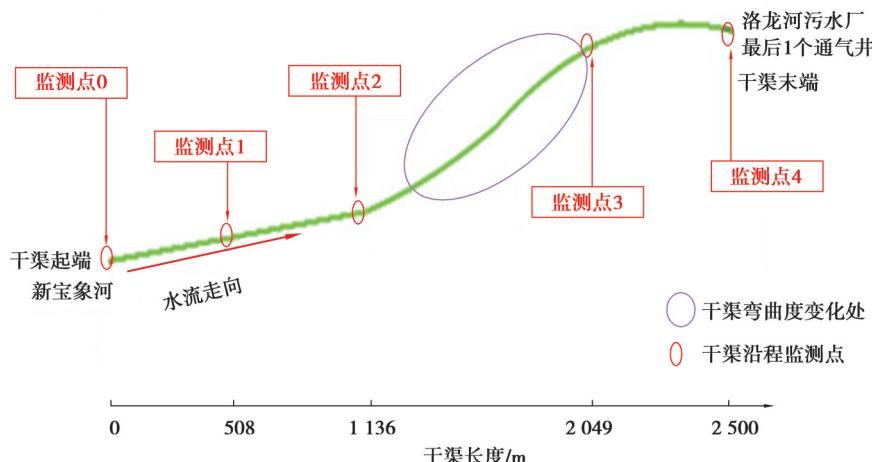


图2 截污干渠模拟几何模型图

Fig. 2 Model diagram of main sewage interception canal

1.2 截污干渠模拟几何模型构建

通过FLUENT中标配的网格划分软件 ICEMCFD 对建立的干渠模拟几何模型进行网格划分,将整条干渠划分为300 000个网格单元。局部划分结果(监测点0~监测点2段)及截污干渠起端、水流方向等如图3所示,其中,绿色区域为截污干渠模型。

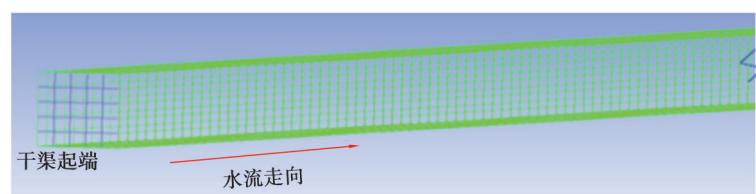


图3 干渠模拟几何模型网格划分图

Fig. 3 Gridding diagram of main sewage interception canal simulated geometric model

在划分网格单元后, 检查网格质量分辨率, 结果表明, 所有网格质量分辨率均大于 0.99, 说明模型网格划分适当, 可以被求解器接受, 网格划分质量过关。网格划分后, 将干渠模型以 mesh 文件格式导出保存, 用于后续的 FLUENT 模拟。

1.3 模拟参数选择与模型验证

考虑滇池流域的地形地势、截污干渠的实际构造及输运污水特征, 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型作为封闭的湍流流动描述, 选择 FLUENT 中双欧拉多相流模型进行截污干渠模拟, 最后, 使用 FLUENT 后处理软件进行后处理, 得到实验结果。

对研究中各参数进行确定, 其中, 水相 Liquid-Water 各参数设定为: 密度 998.2 kg/m^3 (以 20°C 水的密度计), 黏度 $0.001\ 003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$; 固相 Solid-TP 各参数设定为: 密度 $1\ 874 \text{ kg/m}^3$ (以国标检测的正磷酸盐密度计), 黏度 $0.001\ 003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$; 气相 Air 各参数设定为: 密度 1.29 kg/m^3 , 黏度 $0.020\ 01 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。固液相间选用曳力作用 (drag)。干渠各监测点处的模拟进水流量以及 TP 质量浓度根据监测的实际数据设定, 如表 1 所示。由于滇池东岸截污干渠中含有大量悬浮颗粒, 粒径大小不一, TP 主要吸附在 $20\text{--}80 \mu\text{m}$ 的颗粒上^[5], 则在 FLUENT 模拟中设定颗粒粒径为 $50 \mu\text{m}$ 。

表 1 截污干渠各监测点处进水流量与 TP 质量浓度

Table 1 Influent flow and TP concentration of each monitoring point on the main sewage interception canal

监测点序号	距干渠起端距离/m	雨季	
		进水流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
监测点 0	0	10 000	0.45
监测点 1	508	9 400	4.71
监测点 2	1 136	1 109	2.40
监测点 3	2 049	8 666	0.75

截污干渠输运农村农业面源污水过程中, 水流流动速度可能会影响截污干渠中的 TP 质量浓度。利用 FLUENT 模拟了 TP 体积分数(液相中颗粒态 TP 的体积占全部溶液体积的比例)及水流平均流动速度(流动速度)的变化。为了定量表征截污干渠内 TP 分布情况, 参考管渠模拟的相关研究方法^[5], 通过提取 FLUENT 模拟结果中 TP 的体积分数, 采用式(1)计算 TP 质量浓度来评价截污干渠主要设计参数对输运末端 TP 的质量浓度影响。

$$C = P \times \rho \times 1\ 000, \quad (1)$$

式中: C 为 TP 质量浓度, mg/L ; P 为从模拟工况中提取的 TP 的体积分数; ρ 为 TP 密度, 以正磷酸盐密度计算, 其值为 $1\ 874 \text{ kg/m}^3$ 。

由于用 FLUENT 模拟与实地测量的 TP 质量浓度均针对的是滇池东岸研究区域, 空间尺度完全吻合, 因此, 模拟 TP 值与实测 TP 值可以直接比较。图 4 为 TP 质量浓度模拟值与实测值对比图。

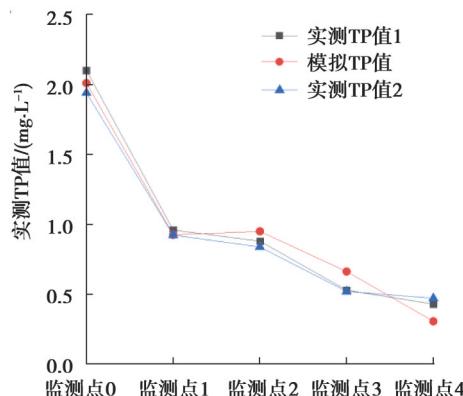


图 4 TP 质量浓度模拟值与实测值对比图

Fig. 4 Comparison of simulated and measured TP concentration

由图4可知,5个监测位点的TP质量浓度的模拟值与2次实测值的均方根误差RSME分别是0.0675 mg/L、0.0823 mg/L,均小于0.1 mg/L,说明该模型能较准确地模拟截污干渠TP的质量浓度,基本符合实际工况。对于监测点4,即干渠输运末端,TP模拟值与2次实测值的平均值之差为0.08 mg/L,两者之间的差异甚小,可认为基于此模型进行的截污干渠主要设计参数对输运末端TP质量浓度的影响研究具有可信度。

1.4 截污干渠模拟几何模型设计参数的设定

1.4.1 截面形状

以截污干渠实际水力直径4.5 m、粗糙度1.2 mm、坡度0.3‰为固定参数,选择截污干渠常用的圆形、梯形、矩形等截面形状考察对输运末端TP质量浓度变化的影响。以具有相同的水力直径为条件,对不同截面形状截污干渠的几何模型尺寸进行设计。考虑到颗粒在输运过程中,管渠截面几何形状侧面倾斜角对颗粒沉降的影响,梯形侧面几何尺寸的倾斜角设置为 $\alpha=45^\circ$ 。

1.4.2 截面粗糙度

以研究区域截污干渠所采用的混凝土材料实际粗糙度1.2 mm为基础,在固定水力直径4.5 m、坡度0.3‰的条件下,分别针对矩形、圆形、梯形截面形状的截污干渠,考察粗糙度为 $r=1$ mm和 $r=2$ mm时输运末端农村农业面源污水中TP质量浓度的变化。

1.4.3 截面水力直径

以研究区域截污干渠的实际截面水力直径4.5 m为基础,在固定干渠粗糙度1.2 mm、坡度0.3‰的条件下,分别改变矩形、圆形、梯形截面形状的长宽、直径、上下底与高度以改变3种截面形状的水力直径,考察截污干渠在每种截面形状的水力直径分别为3、3.5、5.5、6.5 m时输运末端农村农业面源污水中TP质量浓度的变化。

1.4.4 截面坡度

考虑到滇池流域截污干渠实际坡度在0.2‰~0.4‰间变化,本研究设坡度最小值为0.2‰;同时为避免埋深过大并结合实际地形,以《室外排水设计规范》中排水管渠最小坡度的1/2即1‰为坡度最大值。在固定截污干渠水力直径4.5 m、粗糙度1.2 mm的条件下,分别针对矩形、圆形、梯形截面形状的截污干渠,考察坡度为0.2‰、0.5‰、1‰时输运末端农村农业面源污水中TP质量浓度的变化。

上述截污干渠模拟几何模型设计参数设定如表2所示,截污干渠不同截面形状示意如图5所示。

表2 截污干渠模拟几何模型设计参数

Table 2 Design parameters of simulated geometric model of main sewage interception canal

截面形状	项目	尺寸/m	坡度/%	粗糙度/mm
矩形干渠	长	2 500		
	宽	3/3.5/4.5/5.5/6.5		
	高	3/3.5/4.5/5.5/6.5		
圆形干渠	长	2 500		
	直径	3/3.5/4.5/5.5/6.5	0.2/0.3/0.5/1	1.0/1.2/1.4/1.6/2.0
	高			
梯形干渠	长	2 500		
	上底宽	3/3.5/4.5/5.5/6.5		
	下底宽	8.68/10.12/13/15.88/18.76		
	高	2.84/3.31/4.25/5.19/6.13		

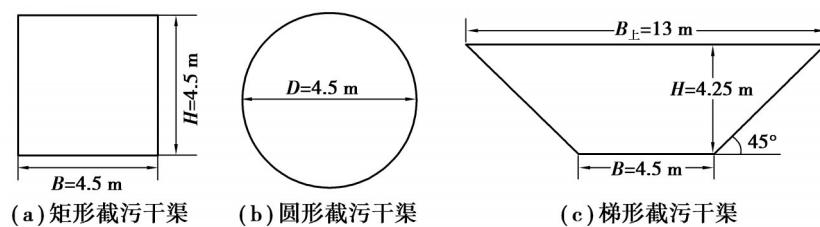


图5 截污干渠不同截面形状示意图

Fig. 5 Schematic diagram of different section shapes of main sewage interception canal

2 FLUENT 模拟结果与讨论

2.1 截面形状对干渠末端出口 TP 质量浓度影响

根据 FLUENT 模拟计算结果, 3 种截面形状截污干渠各监测点中 TP 体积分数与流动速度变化情况如图 6 所示。

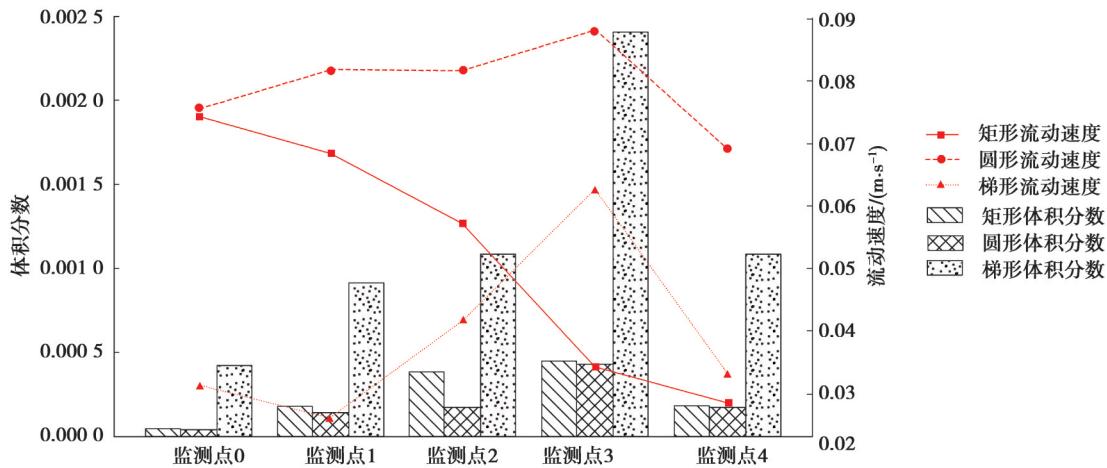


图 6 不同截面形状截污干渠各监测点 TP 体积分数与流动速度

Fig. 6 TP volume fraction and flow velocity at different monitoring points in sewage interception canal with different section shapes

由图 6 可知, 3 种截面干渠在各监测点的 TP 体积分数均是梯形最大, 且呈现出从干渠起端对应的监测点 0 逐渐增大至监测点 3 达到最大, 然后降低的规律, 这可能是由于从干渠起端到监测点 3 沿程均有农灌沟渠的水流汇入, 且在监测点 3 前的汇入流量较大, 在各汇入点干渠的水流流速增大产生湍流, 不仅影响了颗粒态 TP 的沉降, 而且已经沉降的 TP 也因受到冲击重新悬浮; 在监测点 3 后因干渠有明显的拐弯, 而排水管道在拐弯处会产生较大的阻力^[16], 颗粒态 TP 在该区域容易淤积, 导致干渠水流中 TP 的质量浓度下降。在干渠末端出口, 即监测点 4, 梯形截面对应的 TP 体积分数最大, 为 1.08×10^{-3} , 矩形与圆形截面的 TP 体积分数均较小, 分别为 1.82×10^{-4} 、 1.70×10^{-4} , 这可能是由于梯形截面干渠中的流动速度总体低于矩形与圆形截面干渠, 而由理想状态的颗粒沉积公式(2)可知, 由于干渠长度 L 、水面高度 H 保持不变, 则当液体水平流速 v 降低时, 颗粒的沉降速度 u 会随之减小, 其所受的冲剪力较小, 引起的运动扰动也较小^[17], 故末端出口中以颗粒态为主的 TP 质量浓度仍然保持较高水平。

$$L/H = v/u, \quad (2)$$

式中: L 为干渠长度, m; H 为水面高度, m; v 为液体流动速度, m/s; u 为颗粒的沉降速度, m/s。

2.2 粗糙度对干渠末端出口 TP 质量浓度的影响

模拟粗糙度 $r=1 \text{ mm}$ 和 $r=2 \text{ mm}$ 时矩形、圆形、梯形截面干渠的 TP 体积分数、流动速度分别如图 7~9 所示。

由图 7~9 可知, 当粗糙度从 1 mm 变为 2 mm 时, 矩形截污干渠末端出口 TP 体积分数由 2.15×10^{-4} 增大到 2.62×10^{-4} , 液体流动速度略有降低; 圆形截污干渠末端出口 TP 体积分数由 2.02×10^{-4} 增加至 7.52×10^{-4} , 液体流动速度降低; 梯形截污干渠末端出口 TP 体积分数由 2.43×10^{-4} 增大为 7.18×10^{-4} , 而液体流动速度同样也降低。由颗粒在水中所受水流剪切应力公式(3)可知, 截污干渠输运末端农村农业面源污水中 TP 质量浓度随着粗糙度增大而增加可能是由于水流剪切应力与粗糙度平方呈正相关关系, 而剪切应力作用于近渠壁处流体, 与流体流动方向相反, 则靠近渠壁流体的流速降低, 并向流体中心传递作用力, 引起流体速度梯度增大, 平均流速降低^[18], 导致颗粒沉降速度减小而难以沉降, 从而使得干渠末端出口的 TP 体积分数增大。相对于矩形而言, 圆形与梯形截面截污干渠的液体流动速度降低更多, 故其末端出口的 TP 体积分数明显增大。

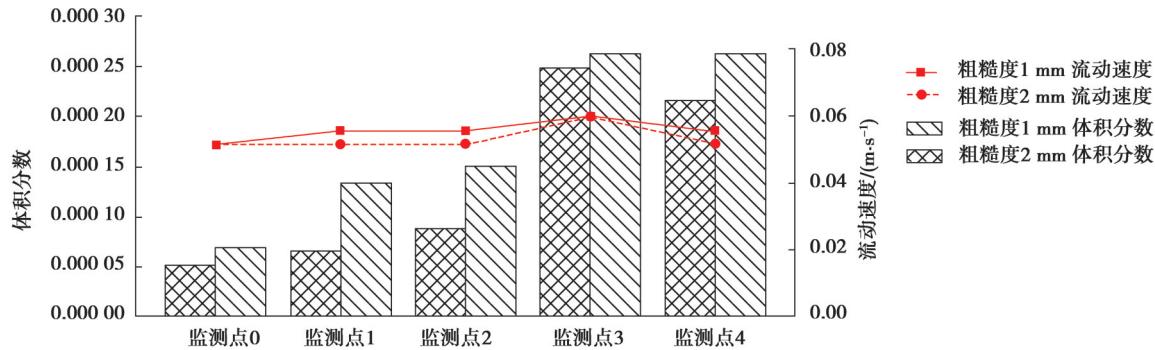


图7 不同粗糙度矩形截面截污干渠TP体积分数与流动速度

Fig.7 TP volume fraction and flow velocity in rectangular cross section sewage interceptors with different roughness

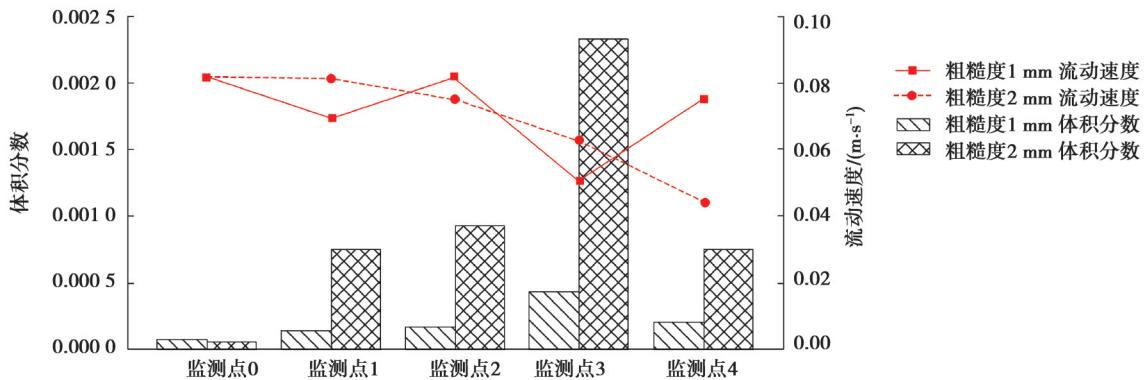


图8 不同粗糙度圆形截面截污干渠TP体积分数与流动速度

Fig.8 TP volume fraction and flow velocity of circular cross-section sewage interceptors with different roughness

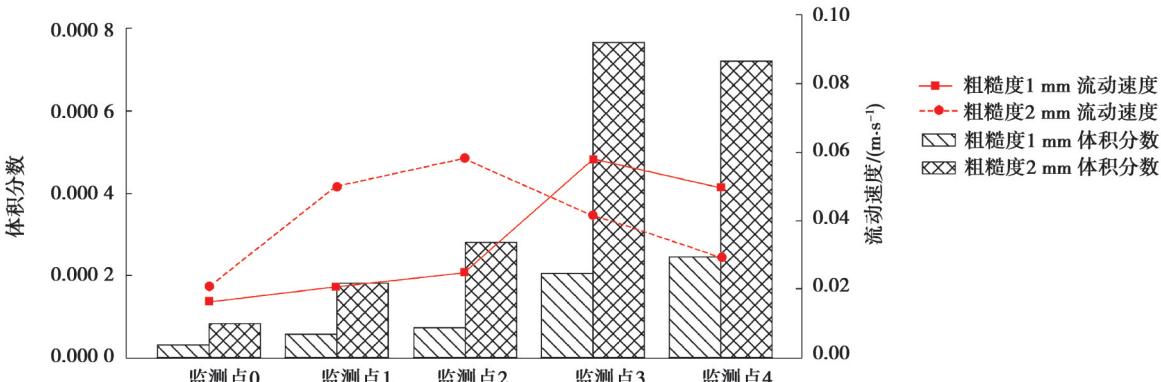


图9 不同粗糙度梯形截面截污干渠TP体积分数与流动速度

Fig.9 TP volume fraction and flow velocity in trapezoidal cross section sewage interceptors with different roughness

$$G = \rho g \frac{U^2 m^2}{R^{1/3}}, \quad (3)$$

式中： G 为水流剪切应力，Pa； U 为断面平均流速，m/s； m 为管渠底面粗糙度，mm； R 为水力半径，m； ρ 为TP密度，kg/m³； g 为重力加速度，取 9.8 m/s²。

2.3 水力直径对干渠末端出口TP质量浓度的影响

模拟水力直径 $D=3, 3.5, 5.5, 6.5$ m 时矩形、圆形、梯形截面干渠的TP体积分数、流动速度分别如图 10~12 所示。

由图 10~12 可知，矩形与梯形截面截污干渠随着水力直径增大，干渠末端出口即监测点 4 的 TP 体积分数明显增大，且矩形截面截污干渠的各监测点基本呈现 TP 体积分数随水力直径增大的规律，这可能是当矩形

截面水力直径变大, 过流面积增大, 液体流通通道变宽, 流动流速 v 减小, 根据公式(2)可知颗粒沉降速度也会相应减小, 故 TP 体积分数增大。梯形截面截污干渠上除监测点 4 外, 其余监测点没有表现出随着水力直径增大, TP 体积分数增大的现象; 而随着水力直径越大, 圆形截面截污干渠每个监测点则基本呈现流动速度越小, TP 体积分数越小的规律, 这说明水力直径对梯形、圆形截面截污干渠的 TP 体积分数影响较为复杂, 不遵循公式(2)的规律。

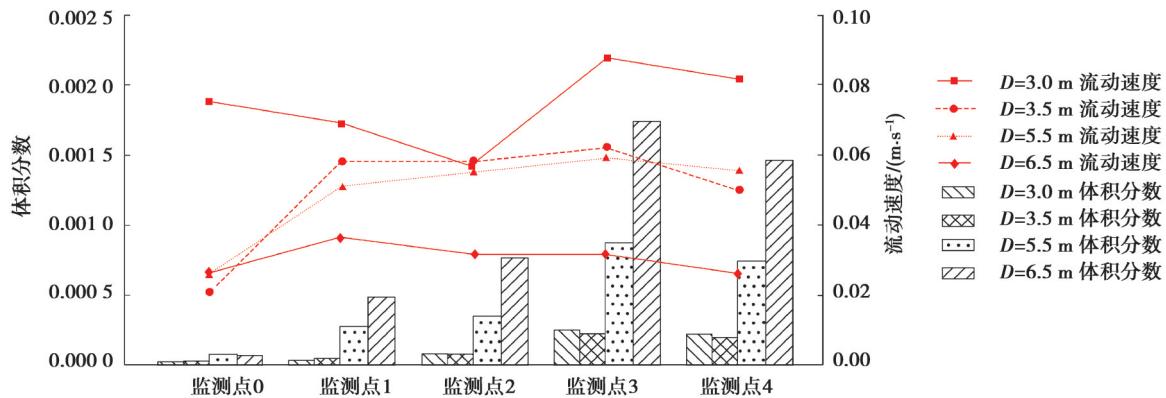


图 10 不同水力直径矩形截面干渠中 TP 体积分数与流动速度

Fig. 10 TP volume fraction and flow velocity in rectangle sewage interception canal with different hydraulic diameters

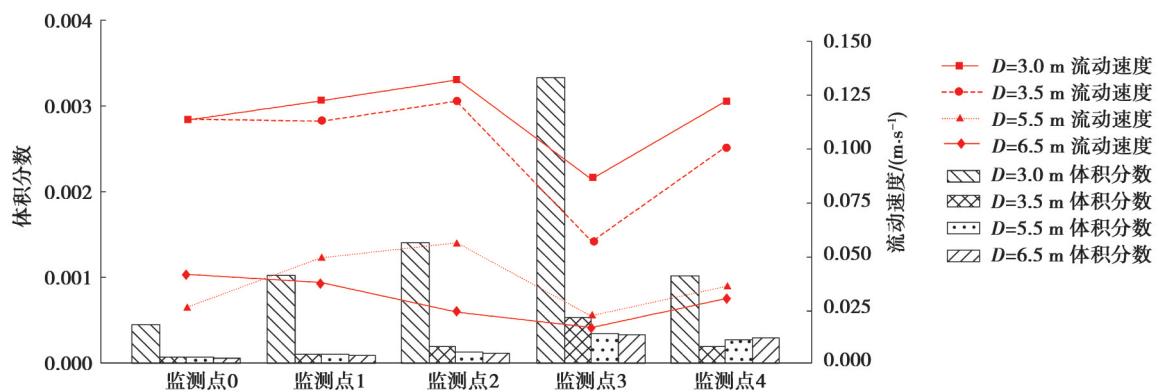


图 11 不同水力直径圆形截面干渠中 TP 体积分数与流动速度

Fig. 11 TP volume fraction and flow velocity in circular sewage interception canal with different hydraulic diameters

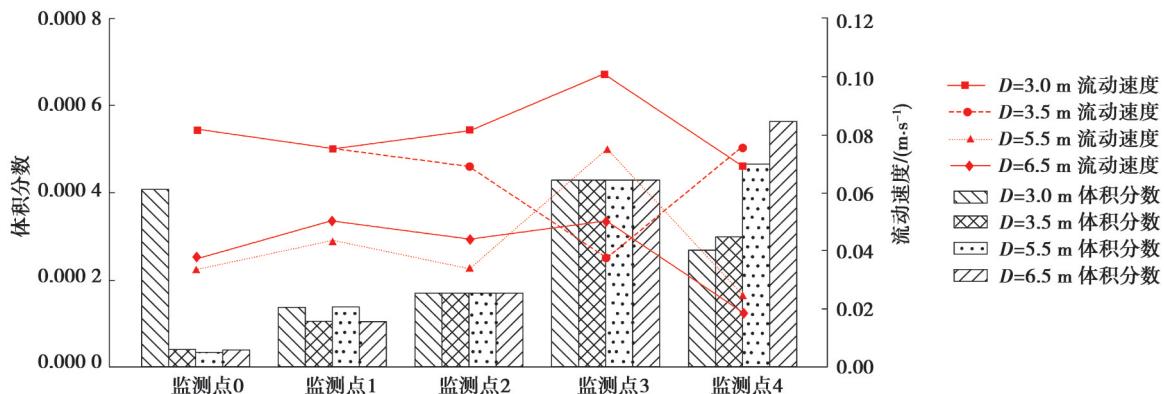


图 12 不同水力直径梯形截面干渠中 TP 体积分数与流动速度

Fig. 12 TP volume fraction and flow velocity in trapezoidal sewage interception canal with different hydraulic diameters

2.4 坡度对干渠末端出口 TP 质量浓度的影响

模拟坡度 $i=0.2\%、0.5\%、1.0\%$ 时矩形、圆形、梯形截面干渠的 TP 体积分数、流动速度分别如图 13~15 所示。

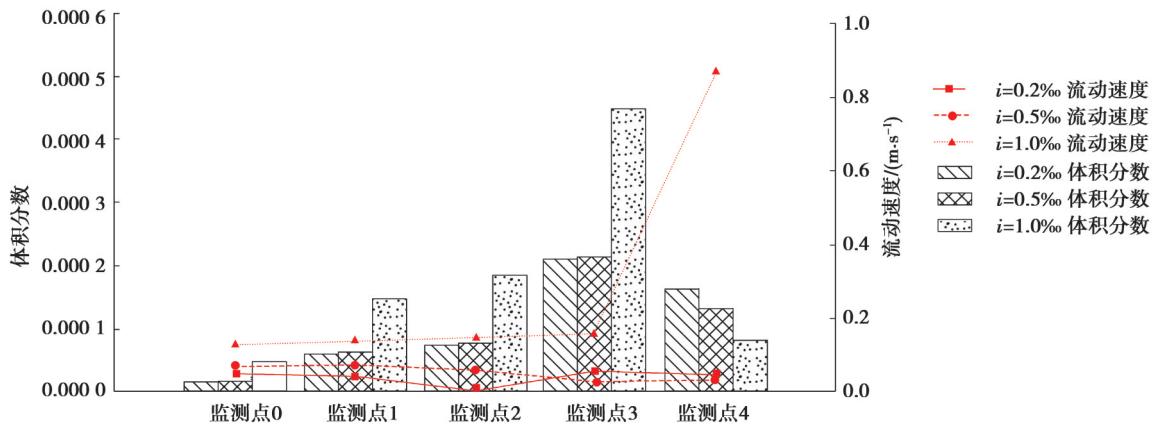


图 13 不同坡度矩形截面干渠中 TP 体积分数与流动速度

Fig. 13 TP volume fraction and flow velocity in rectangular sewage interception canal with different slopes

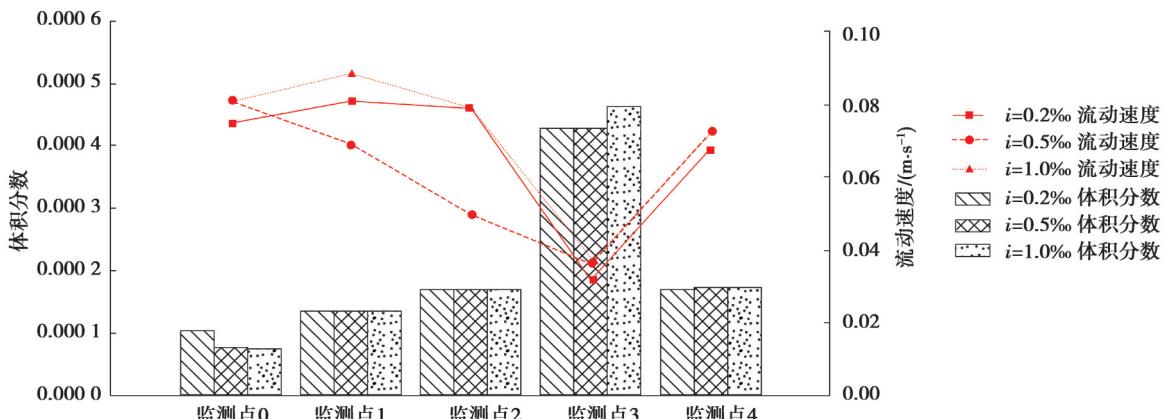


图 14 不同坡度圆形截面干渠中 TP 体积分数与流动速度

Fig. 14 TP volume fraction and flow velocity in circular sewage interception canal with different slopes

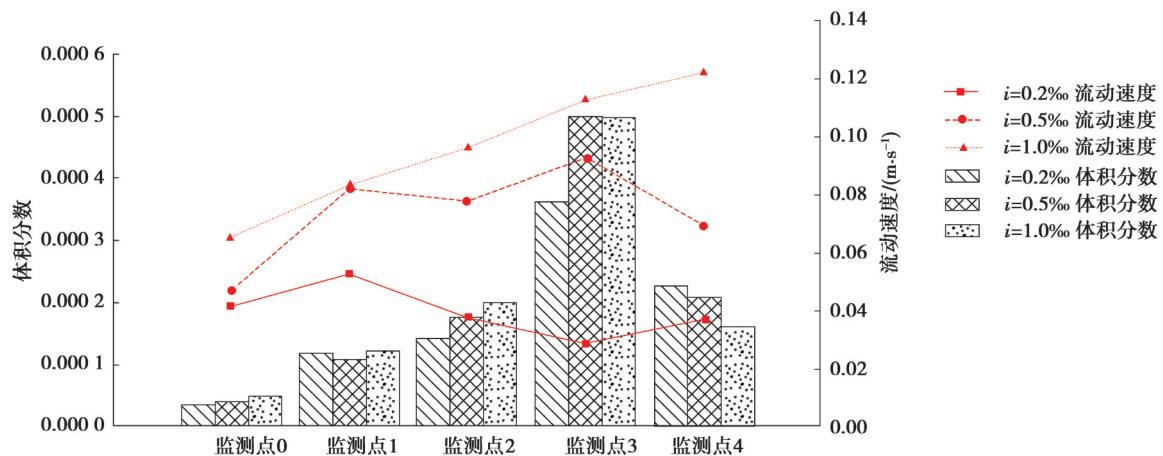


图 15 不同坡度梯形截面干渠中 TP 体积分数与流动速度

Fig. 15 TP volume fraction and flow velocity in trapezoidal sewage interception canal with different slopes

由图 13~15 可知, 随着坡度增大, 矩形及梯形截面截污干渠输运末端监测点 4 的农村农业面源中流动速度增大, 而 TP 体积分数则逐渐减小, 根据达西公式(4)可知, 速度的二次方与坡度成正比, 坡度增加会导致流动速度增加^[19], 同 2.1 节分析, 流速的增加会使颗粒态 TP 的沉降速度 u 增加, 故 TP 体积分数减小; 圆形截面截污干渠末端的流动速度及 TP 体积分数变化不大, 坡度对圆形截面截污干渠输运农村农业面源中 TP 质量浓度变化影响较小; 与其他截面的截污干渠相比, 梯形截面截污干渠末端出口 TP 质量浓度最高, 这可能是由于管渠管壁倾角越大, 固体颗粒的可沉积临界流速越大^[20], 而在 3 种截面干渠中, 相同坡度条件下梯形倾角最小为 45°, 固体颗粒沉积速度小, 故干渠末端 TP 体积分数大。

$$v = C \sqrt{RJ}, \quad (4)$$

式中: v 为断面平均流速, m/s; C 为谢才系数; R 为水力半径, m; J 为坡度^[21]。

3 结 论

采用 FLUENT 软件模拟滇池东岸新宝象河至洛龙河污水厂段截污干渠, 研究截面形状、粗糙度、水力直径、坡度等主要设计参数对输运末端农村农业面源中 TP 质量浓度的影响, 得到以下结论:

- 1) 3 种截面形状中, 圆形截面截污干渠输运末端农村农业面源 TP 质量浓度最低, 梯形截面截污干渠末端 TP 质量浓度最高。
- 2) 随着粗糙度增大, 截污干渠输运末端农村农业面源污水 TP 质量浓度对 3 种截面形状而言均升高, 其中矩形截面的变化幅度较小, 圆形截面的变化幅度最大。
- 3) 随着水力直径增大, 截污干渠输运末端出口处农村农业面源污水 TP 质量浓度对 3 种截面形状而言, 矩形与梯形截面均增大, 圆形截面则总体降低。
- 4) 随着坡度增加, 截污干渠末端出口处农村农业面源污水 TP 质量浓度对矩形及梯形截面截污干渠均降低, 对圆形截面截污干渠变化不大。

参考文献

- [1] 胡晓惠. 基于 SWMM 的滇池环湖截污干渠截留农业径流对干渠水量的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Hu X H. Study on the influence of interception of agricultural runoff on the water quantity of the main canal in Dianchi Lake based on SWMM[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [2] 郭怀成, 贺彬, 宋立荣, 等. 滇池流域水污染治理与富营养化控制技术研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
Guo H C, He B, Song L R, et al. Integrated technical framework for water pollution control and eutrophication restoration of lake Dianchi watershed[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2017. (in Chinese)
- [3] 刘瑞华, 曹暄林. 滇池 20 年污染治理实践与探索[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(6): 31-37.
Liu R H, Cao X L. Pollution treatment of practices of Dianchi Lake in the past twenty years[J]. Environmental Science Survey, 2017, 36(6): 31-37. (in Chinese)
- [4] 郝晓宇. 城市污水管网水质变化规律模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
Hao X Y. Simulation study on water quality change law of urban sewage pipe network[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 魏婷. 滇池东岸非点源污染负荷控制初探[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Wei T. Preliminary study on load control of non-point source pollution on the east coast of Dianchi Lake[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [6] 王涛涛. MBR 工艺处理滇池流域农村农业污水中试研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Wang T T. Pilot study on MBR process for treating rural agricultural sewage in Dianchi Lake Basin[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [7] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33(4part2): 796-822.
- [8] Bowes M J, House W A, Hodgkinson R A, et al. Phosphorus-discharge hysteresis during storm events along a river catchment: the River Swale, UK[J]. Water Research, 2005, 39(5): 751-762.
- [9] 戴丽, 张萍, 汤承彬, 等. 昆明地区花卉生产对水环境影响的调查研究[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(5): 90-92.

- Dai L, Zhang P, Tang C B, et al. An investigation and research on the impact of horticulture on water environment in Kunming[J]. Environmental Science Survey, 2012, 31(5): 90-92. (in Chinese)
- [10] 徐晓梅, 吴雪, 何佳, 等. 滇池流域水污染特征(1988-2014年)及防治对策[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 476-484.
- Xu X M, Wu X, He J, et al. Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed(1988-2014) and identification of countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 476-484. (in Chinese)
- [11] 张德刚, 汤利, 陈永川, 等. 滇池流域典型城郊村镇排放污水 COD_{cr} TSS 特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1446-1449.
- Zhang D G, Tang L, Chen Y C, et al. Characteristics of chemical oxygen demand and total suspended solid in discharged household wastewater from typical suburb regions in Dianchi Lake Catchments[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1446-1449. (in Chinese)
- [12] 喻晓琴. 滇池流域典型城镇雨水径流特征及截流方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- Yu X Q. Study on characteristics of rainwater runoff and interception methods in typical towns of Dianchi Lake basin[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [13] 孙远军, 卢士强, 邵一平, 等. 城市河流水体污染物降解规律及降解系数研究[J]. 上海环境科学集, 2020(1): 99-104.
- Sun Y J, Lu S Q, Shao Y P, et al. A study on degradation rules and coefficients of water pollutants in urban rivers[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2020(1): 99-104. (in Chinese)
- [14] 刘永兵, 陈纪忠, 阳永荣. 管道内液固浆液输送的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(5): 858-863.
- Liu Y B, Chen J Z, Yang Y R. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in slurry pipeline transportation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(5): 858-863. (in Chinese)
- [15] 毕军鑫, 徐得潜. 基于数值模拟的给水厂平流式沉淀池优化设计[J]. 工业用水与废水, 2015, 46(5): 21-26.
- Bi J X, Xu D Q. Optimal design of horizontal flow sedimentation tank based on CFD simulation[J]. Industrial Water & Wastewater, 2015, 46(5): 21-26. (in Chinese)
- [16] 付博文, 金鹏康, 石山, 等. 西安市污水管网中沉积物特性研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 119-122, 127.
- Fu B W, Jin P K, Shi S, et al. Sediment characteristics of sewer network in Xi'an city[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 119-122, 127. (in Chinese)
- [17] 潘馨馨, 王亚琳. 基于 FLOW3D 模型浅析河道断面形状对河道水力特性的影响[J]. 科技资讯, 2019, 17(26): 33-35.
- Pan X X, Wang Y L. Analysis on the influence of river section shape on river hydraulic characteristics based on FLOW3D model[J]. Science & Technology Information, 2019, 17(26): 33-35. (in Chinese)
- [18] 施明新, 吴发启, 田国成, 等. 地表粗糙度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 83-87.
- Shi M X, Wu F Q, Tian G C, et al. Influence of surface roughness on hydrodynamic parameters of overland flow[J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2015, 34(7): 83-87. (in Chinese)
- [19] 张敬玉, 王建龙, 涂楠楠, 等. 坡度对低影响开发道路水文参数的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(12): 98-103.
- Zhang J Y, Wang J L, Tu N N, et al. Influence of slope on hydrological parameters of low impact development roads[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(12): 98-103. (in Chinese)
- [20] 刘刚, 汤苑楠, 李博, 等. 成品油管道内杂质运移沉积及其影响规律[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 708-715.
- Liu G, Tang Y N, Li B, et al. Movement, deposition and influence laws of impurities in the product oil pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(6): 708-715. (in Chinese)
- [21] Valiantzas J D. Explicit power formula for the darcy-weisbach pipe flow equation: application in optimal pipeline design[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(4): 454-461.