



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202001066

中图分类号 X52

文献标识码 A

周良洁, 郑天龙, 刘俊新. 平原河网地区不同类型农村小管径排水管道数值模拟[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3072-3081.

ZHOU Liangjie, ZHENG Tianlong, LIU Junxin. Numerical simulation of different types of rural drainage pipeline with small diameter in plain river network area[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3072-3081.

平原河网地区不同类型农村小管径排水管道数值模拟

周良洁^{1,2}, 郑天龙^{1,2,*}, 刘俊新^{1,2}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 水污染控制实验室, 北京 100085

2. 中国科学院大学, 北京 100049

第一作者: 周良洁(1994—), 女, 硕士研究生。研究方向: 农村小管径排水系统。E-mail: ljzhou_st@rcees.ac.cn

*通信作者: 郑天龙(1988—), 男, 博士, 助理研究员。研究方向: 农村污水处理技术。E-mail: tlzheng@rcees.ac.cn

摘要 农村污水未经处理直接排放导致农村环境受到污染, 目前我国大部分农村缺乏完善的污水收集系统, 已经铺设排水系统的农村大多存在管网设计与农村排水特点不符、管网建设资金过大等问题。为了解决上述问题, 建议在农村建设小管径排水系统进行污水收集, 针对平原、丘陵及山区 3 种类型的农村排水管网的水力学特性进行了探讨, 选取其中的管段进行了数值模拟。结果表明: 弯管部分压力变化趋势与速度变化趋势相反, 弯管处湍动能较大; 平原和丘陵的管道设计充满度为 0.3~0.9, 设计流速为 0.7~0.9 m·s⁻¹, 山区的管道设计充满度为 0.1~0.3, 设计流速约为 1 m·s⁻¹。上述研究丰富了对小管径排水系统管道内部流态的认识, 可为更合理的农村排水管网设计及风险位点的预测提供参考。

关键词 平原河网地区; 农村排水特征; 小管径排水管道; 多相流模型; 数值模拟

随着国家经济水平的提升、城市化建设的加快, 农村经济也在稳步增长, 农村环境保护意识也逐渐提升。与城市排水特点不同, 农村人口居住分散、用水量相对较少、产生的生活污水量也较小。农村排水日变化系数大, 受人口数量、居民生活习惯、季节变化影响较大; 同时, 农村排水时变化系数也较大, 每日排水主要集中在早晨、中午、晚间用水高峰期, 夜间排水量较小, 甚至可能断流。农村大多通过现有沟渠将生活污水排放到就近水体, 少部分农村现存的管网也多为雨污合流排放, 直排、乱排现象较普遍, 导致农村周边水体受到较严重的污染, 进而影响农村的大气环境和土壤环境, 给美丽宜居乡村建设的推进带来不小的阻碍。城市排水系统管径较大, 建设费用大, 其中农村污水治理工程中管道敷设成本占建设投资的 70% 以上, 所以城市排水管网不适合在农村地区投入使用。因此, 研究管径较小、建设费用更低、适合在农村地区使用的小管径排水系统是十分必要的。小管径排水系统, 是指管径不超过 200 mm, 主要收集截留池或化粪池出

收稿日期: 2020-01-10; 录用日期: 2020-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51838013); 国家自然科学基金青年资助项目(51808536); 国家重点研发计划(2016YFC0400804)

水中水相部分的排水系统。该排水系统具有管径小、附属设施简便等特点，使其在农村地区更具适用性。

城市排水系统管径较大，与农村排水特点不符，不适合在农村地区使用。在我国东部平原河网地区少部分已铺设污水收集管网的农村中，存在管网设计不规范、运维管理措施不完善等问题。小管径排水系统在东部平原河网地区有一些应用，但目前对该排水系统管道内水流特征及水力学特性的认识不够全面，故对此展开研究。目前，利用数值模拟对流态进行模拟的技术比较广泛且模拟结果准确度较高^[1-4]，结合实际排水数据能得到比较符合实际的结果。

我国农村对小管径排水系统的应用较少，因此，本研究通过对不同类型农村生活污水排放特点及水质特点的分析，并根据现有的排水设计规范，提出适合不同类型农村使用的小管径排水收集系统，以改善农村排水现状；利用流体体积模型，模拟重力流排水管道在不同应用条件下的气液两相流，分析其不同流态下的压力、湍动能的分布规律，为构建符合农村排水特点及农村经济情况的污水收集系统提供参考。

1 农村排水现状、模型的选择及模拟方法

1.1 不同类型农村排水现状特性分析

1) 不同类型农村人口特性分析。东部河网的平原地区地势平坦，水系分布广泛，农村人口数量相对较多，村庄聚集程度较高，依水而居，各村庄人口数量平均为 1 000~2 000 人；丘陵地区地势起伏程度、人口数量、村庄聚集程度均居于平原和山区两者之间，各村庄人口数平均在 500~1 000 人；山区地势起伏明显，农村人口数量相对较少，村庄分布较为分散，各村庄人口数量约为 500 人。

2) 不同类型农村排水特点分析。本研究选取我国东部平原、丘陵和山区 3 个类型的农村排水，按照特点对其进行了研究和分析。平原地区农村经济条件相对较好，人口相对集中，卫生设施、淋浴设施较齐全；丘陵和山区村庄分布较为分散，经济条件相对较差，卫生设施、淋浴设施不够齐全。根据水资源公报^[5-7]、已有研究^[8]、相关指南^[9-11]及实测数据等，得知人均用水量为 60~200 L·d⁻¹。排水量为用水量与排水系数的乘积，排水系数通常约取 0.8。

3) 污染物浓度的特性分析。农村生活污水中含有悬浮物、有机物、氮磷营养物质、油脂等成分，其主要来源于厨房、洗浴、洗衣、厕所排水，各类污水占比受季节、该地生活条件及生活习惯等因素的影响。对于一般的生活污水，居民人均用水量小于 100 L·d⁻¹，污水 COD 为 200~500 mg·L⁻¹；居民人均用水量在 100~200 L·d⁻¹，污水 COD 可根据用水量的大小在 300~400 mg·L⁻¹ 进行选择^[12]。冯华军等^[13]的研究结果表明，东部地区生活污水 COD 为 135~639 mg·L⁻¹。相关指南^[9-11]建议农村生活污水 COD 应设计为 250~400 mg·L⁻¹。

4) 污水参数特性分析。不同类型农村分布情况不同，平原地区村庄分布相对集中，经济条件相对较好，居民用水量和排水量相对较大；山区经济条件较平原区差，居民用水量和排水量相对较小。污水在进入管网前先流入化粪池，污水中的大颗粒固体和漂浮物质在化粪池内与水相分离，从而进入管网的污水中的易沉降固体和漂浮物均较少，本次模拟中生活污水参数如表 1 所示。

表 1 农村生活污水的特性
Table 1 Characteristics of rural domestic sewage

地区	人口数量/人	最高排水量/(L·(人·d) ⁻¹)	平均排水量/(L·(人·d) ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)
平原	2 000	320.2	160.1±27.4	338.1±21.7
丘陵	1 000	260.4	130.2±21.6	354.3±37.1
山区	500	200.2	100.1±15.8	401.2±43.4

1.2 小管径排水管道数值模拟的模型选择

多相流模型可分为气-液或液-液流动、气-固流动、液-固流动、三相流动共计4类模型。多相流模型主要包括VOF模型、混合模型、欧拉模型3种。本研究涉及的多相流为气-液分层两相流，是存在明确定义的界面分离的不混溶流体的流动，故选用VOF模型进行模拟。VOF模型^[14]可以通过求解一组动量方程并跟踪整个流体域内每种流体的体积分数，来模拟2种或多种不混溶流体，本次模拟涉及的方程有连续性方程(见式(1))和动量方程(见式(2)~式(4))。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u \omega)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v \omega)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega \omega)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中： ρ 为流体密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； p 为压力，Pa； u 、 v 、 ω 为流体在 t 时刻分别在点 (x, y, z) 处的速度分量， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； t 为时间，s； μ 为动力黏性系数， $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ 。

采用Realizable k - ε 双方程模型对管道进行模拟，模拟方法可参照SHIH等^[15]提出的方法。相比于标准方程，其可给出更合理的湍流尺度，湍动能方程见式(5)，扩散方程见式(6)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中： G_k 和 G_b 分别为平均速度梯度和浮力引起的湍动能 k 的产生项； Y_M 为脉动扩张项； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 均为经验常数； σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能和耗散率普朗特数； S_k 和 S_ε 为定义源项。其中，模型常数取值^[16]为 $C_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.92$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.3 小管径管道数值模拟

平原地区、丘陵地区和山区的农村分别以不同坡度表示。选取管段为村庄排水干管弯管部分，排水干管收集水量为村庄总排水量，而弯管部分水流方向出现明显变化，其水力学特性与直管管段有较大差异，故选取此部分管段进行模拟研究。弯管前部管道长度为管径的5倍，弯管后部管道长度为管径的7.5倍，采用结构化网格进行划分，并加密边界层和弯管部分，网格划分结果如图1所示。通过网格无关性验证，并综合考虑模拟误差及计算资源消耗^[17-20]，以确定网格数量。

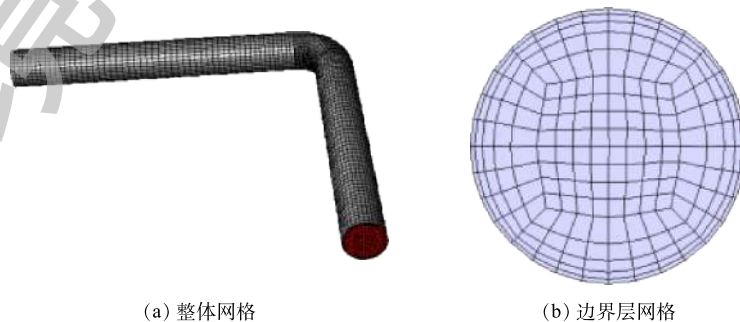


图1 模型整体网格及边界层网格

Fig. 1 Global and boundary layer mesh of the model

本研究针对不同类型农村中相同人数、相同流量 2 种情况进行了模拟，主要通过水力计算^[21]确定管道管径、流速和充满度。具体初始模拟参数如表 2 所示。

表 2 初始模拟参数
Table 2 Initial simulation parameters

地区	编号	流量/(L·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)	坡度	充满度	管径/mm
平原	(1)	7.57	0.72	0.003	0.37	200
	(2)	3.84	0.59	0.003	0.26	200
	(3)	7.62	0.80	0.004	0.4	180
	(4)	3.87	0.66	0.004	0.28	180
	(5)	7.51	0.87	0.005	0.49	150
	(6)	3.66	0.72	0.005	0.33	150
丘陵	(1)	3.05	0.68	0.005	0.3	150
	(2)	1.50	0.56	0.005	0.21	150
	(3)	3.17	0.83	0.008	0.37	120
	(4)	1.61	0.69	0.008	0.26	120
	(5)	3.11	0.91	0.01	0.45	100
	(6)	1.56	0.75	0.01	0.31	100
山区	(1)	1.17	0.68	0.01	0.21	120
	(2)	0.59	0.55	0.01	0.15	120
	(3)	1.18	1.01	0.03	0.18	110
	(4)	0.60	0.83	0.03	0.13	110
	(5)	1.18	1.23	0.05	0.18	100
	(6)	0.60	1.00	0.05	0.13	100

2 模拟结果与分析

2.1 管道内流线分析

不同类型村庄的排水管道内流线分布如图 2 所示。流线显示了流体质点的运动轨迹，由图 2 可见，管道下部的水流质点运动轨迹变化幅度较小。在不同类型村庄的排水管道中，水流质点在入口处至弯道之前为均匀向前运动，流线分布较均匀，水面稳定；在弯道处流线发生变化，形成二次流，水流质点经过弯道后，在惯性力和离心力的作用下，向下游管壁外侧移动，水面出现波动；而在继续向管道出口流动的过程中，流线又逐渐趋于均匀分布，水面恢复平稳。同一地区的排水管道中，随着流速的增加，流线趋于均匀分布的位置与弯道间的距离逐渐增大。

管道上部的空气质点运动轨迹变化幅度较大。不同类型村庄的排水管道中，当管径取最大值，即充满度最小时，入口附近空气的运动轨迹呈旋转分布；当管径取最小值，即充满度最大时，入口附近空气的运动轨迹较为平稳，经过弯道时轨迹变化幅度增大，而后又趋于平稳。平原地区的排水管道中，随着管径的减小，充满度增加，入口附近空气的运动轨迹从旋转趋于平稳。

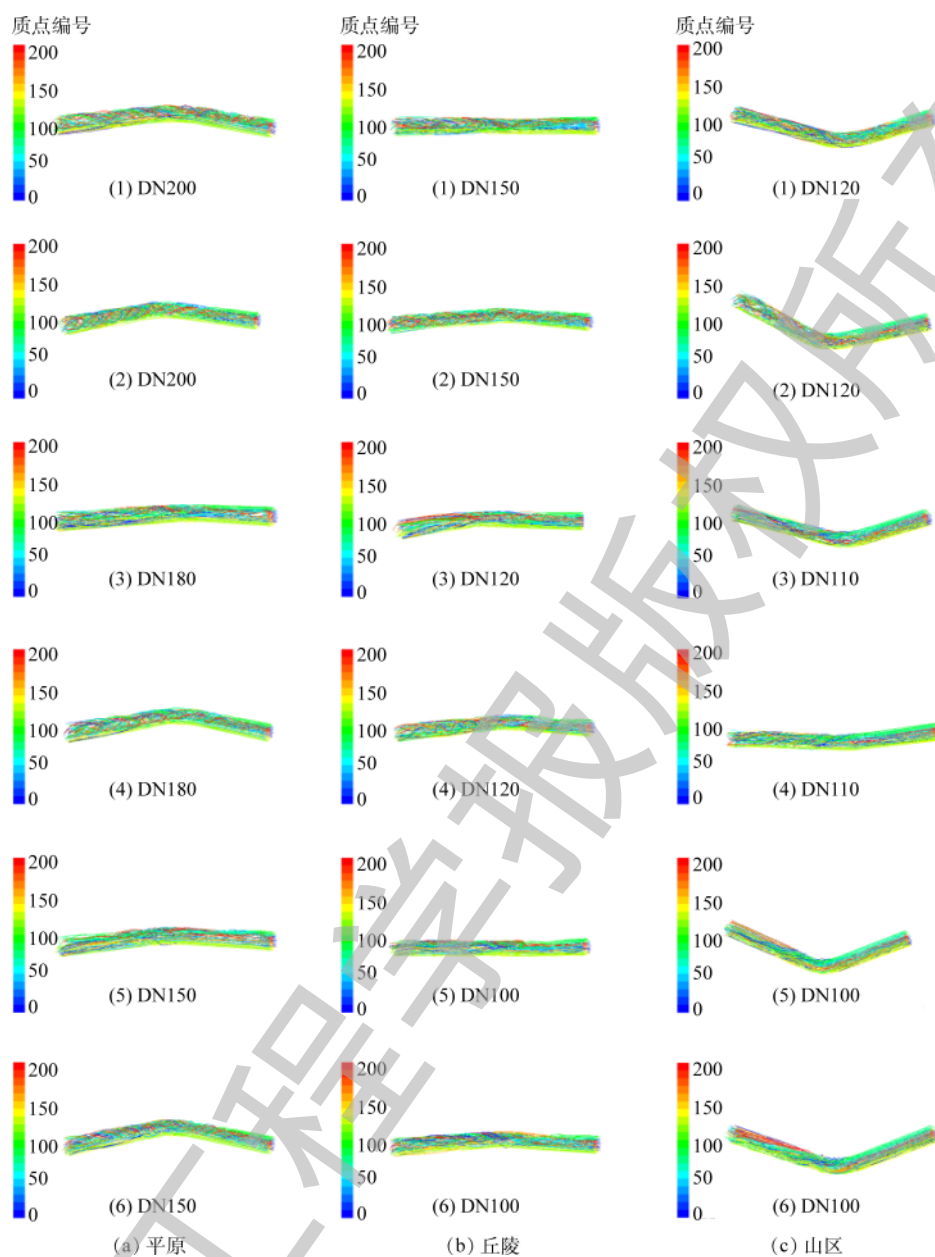


图2 排水管道内流线分布

Fig. 2 Streamline distribution in the drainage pipes

2.2 管道内压力分析

不同类型村庄的排水管道内压力分布情况如图3所示。在不同类型村庄的排水管道中,弯道处所受到的压力最大,弯道外侧的压力大于内侧,压力从入口到弯管之前压力均匀分布,到弯管处压力由管道外侧向内侧逐级递减,弯管处压力等值线沿45°截面对称分布。在同一地区的排水管道中,压力呈现由均匀分布变为弯道处外侧向内侧递减的梯度分布,再到均匀分布的规律;山区排水管道由于充满度较小,压力分布情况与平原、丘陵地区不同,管径较小时,弯道内侧因没有水流通过而呈现负压状态。

由图3可知,在不同类型村庄的排水管道中均出现如下结果,弯管外侧出现高压腔,内侧出现低压腔,从内壁道外壁压力逐渐增大。该结果与其他研究^[22-24]的结果相类似。

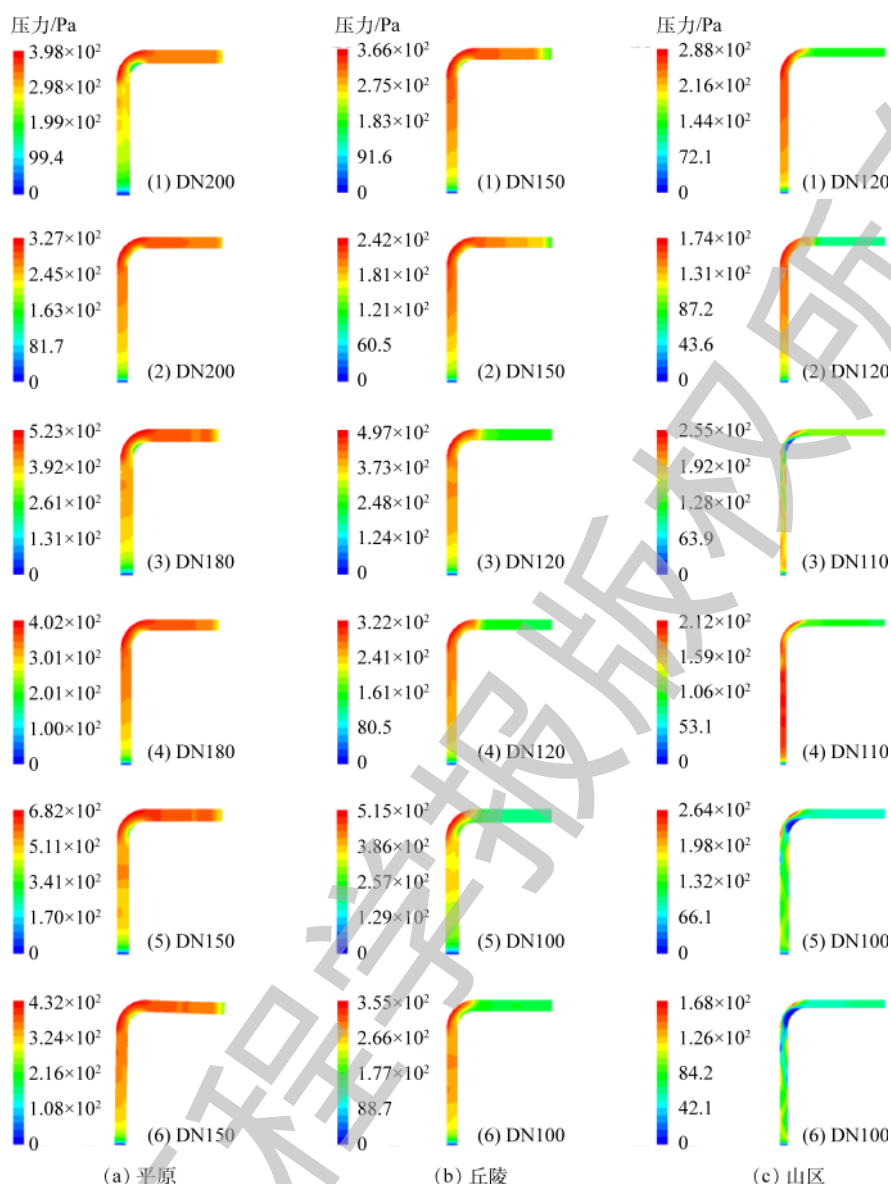


图 3 排水管道内压力分布

Fig. 3 Pressure distribution in the drainage pipes

2.3 管道内速度分析

不同类型村庄的排水管道内速度分布如图 4 所示，速度矢量图如图 5 所示。在不同类型村庄的排水管道中，管道弯曲部分二次流逐渐形成，高流速区逐渐往弯道内侧移动，即弯道内侧流速大于外侧流速，山区排水管网充满度较小，在部分管道中上述现象不明显，当管道充满度增加后，该现象再次出现。在同一地区的排水管道中，弯管下游外壁面及弯管内侧流速较大；平原地区排水管道弯管内侧上游速度较大，弯管内侧下游速度小，结合矢量图可以发现，在弯管内侧下游出现小范围的回流涡旋，使得弯管内侧速度减小，这是由于水流指点受到离心力的差异，内侧出现分离区，流速慢的质点会填补空区而形成涡旋和回流^[25]。

由图 4 和图 5 可知，在不同类型村庄的排水管道中均出现如下结果：弯管内侧为高流速区，外侧为低流速区，内壁容易产生管壁磨损；沿离心力增加的方向流速逐渐减小，且在离心力的作用下流体易产生二次旋流。该结果与其他研究^[23-24, 26-28]的结果相似。

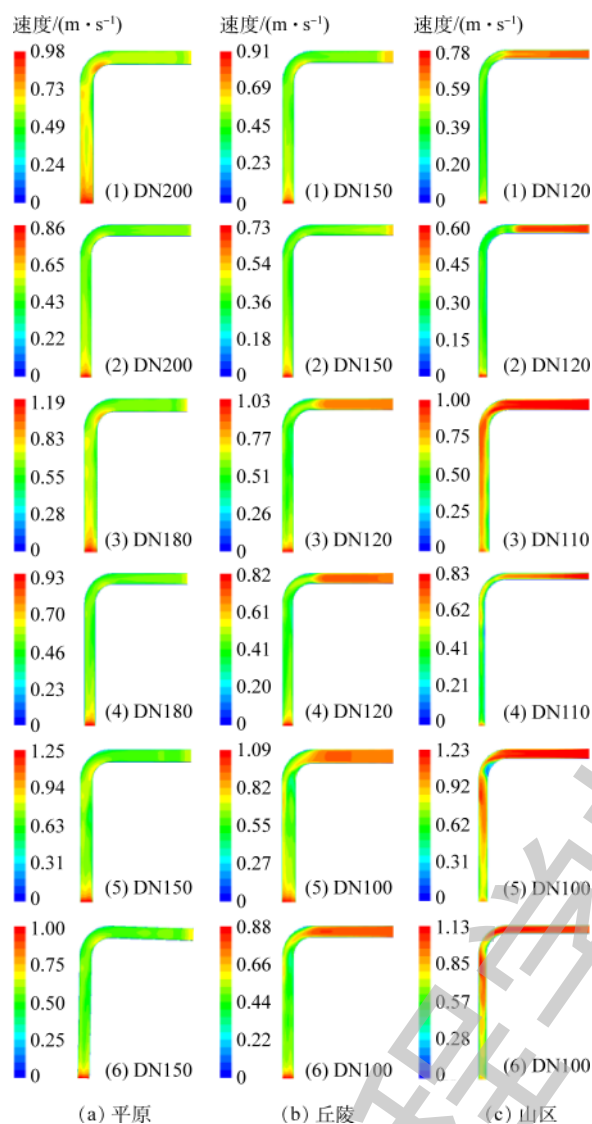


图4 排水管道内速度分布

Fig. 4 Velocity distribution in the drainage pipes

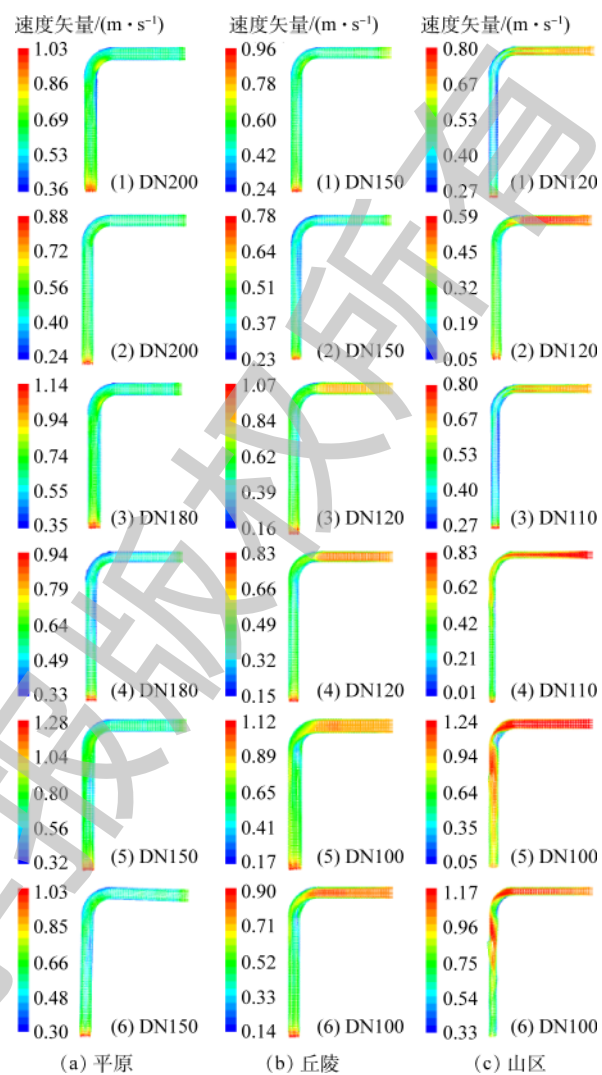


图5 排水管道内速度矢量分布

Fig. 5 Velocity vector distribution in the drainage pipes

2.4 管道内湍动能分析

不同类型村庄的排水管道内湍动能分布如图6所示。管道内壁附着生物膜，生物膜内部的各种反应与营养物质、溶解氧等传质过程有关，而湍流过程及水流流态对生物膜传质过程有较大的影响^[29]，因此，对管道内湍动能的研究是十分重要的。水流通过弯道后有一定的能量损失，能量损失来源主要为流速重分布及水流分离流^[30]。在不同类型村庄的排水管道中，弯道附近的湍流度较大。在平原和丘陵地区的排水管道中，管道近壁面处湍动能大于管道内部的湍动能，弯道下游内壁面处湍动能大，此处传质过程顺利进行；在山区排水管道中，管道充满度较小，弯道附近湍动能大，流层受流体与管壁间剪切力的影响较大，有着较强的物质和能量交换过程。

由图6可知，在不同类型村庄的排水管道内，气液两相相互作用，气体的存在导致流体与壁面间的摩擦系数增大，导致能量损失也随之增大；近壁面处湍动能较大，能量损失也较大。该结果与其他研究^[31]的实验结果相类似。

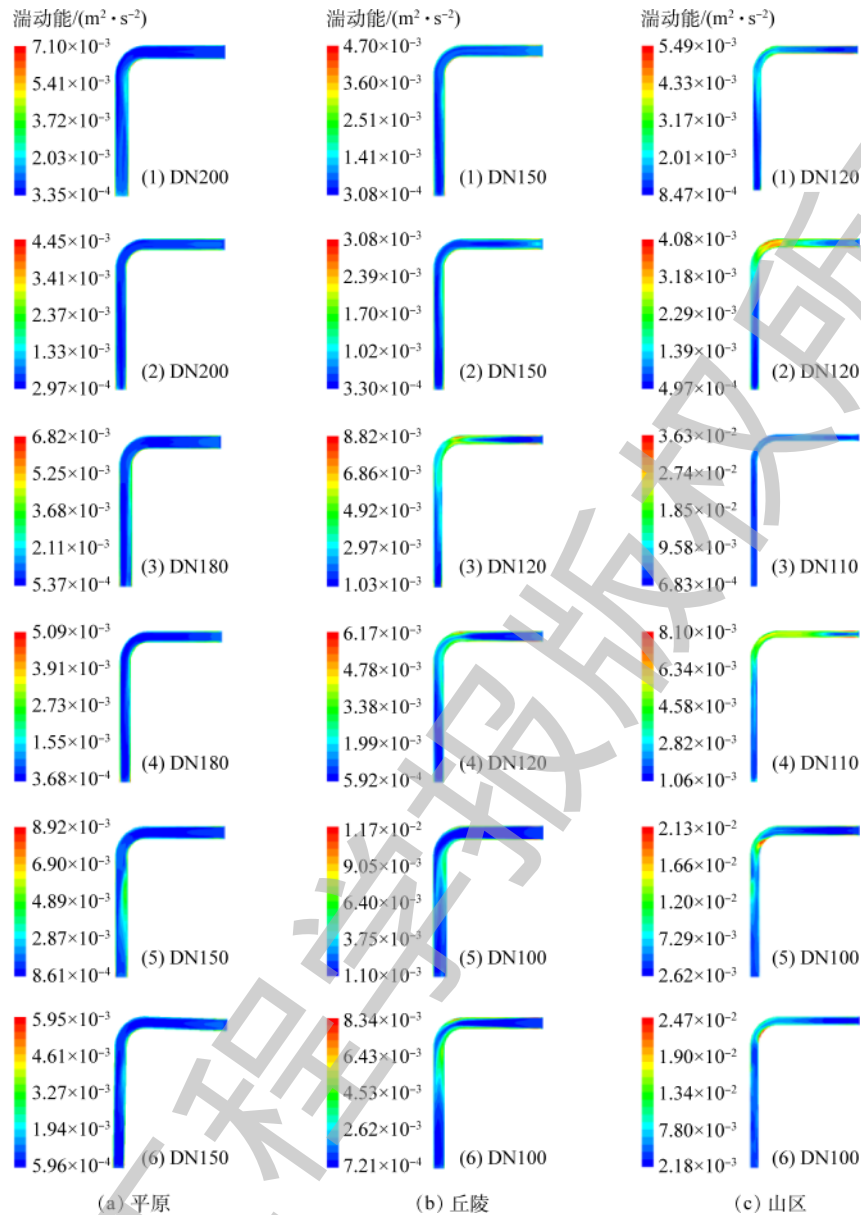


图 6 排水管道内湍动能分布

Fig. 6 Turbulent kinetic energy distribution in the drainage pipes

3 结论

1) 水流在弯道前均匀分布，经过弯道时形成二次流，流过弯道后逐渐恢复均匀分布；由于水流质点速度方向改变及横向剪切力的作用，压力由弯道外侧向内侧递减，弯管外壁面压力大于弯管内壁面压力；速度由外侧向内侧递减，弯管内壁面流速一般较大，但可能会出现分离区，流速慢的质点回填而形成涡旋和回流；弯管附近湍流较大，存在较强的物质和能量的交换过程。

2) 对人口为 2 000 人左右平原地区的农村而言，可选取管径为 150~180 mm 的管道作为排水干管，充满度为 0.3~0.5，流速为 0.7~0.9 m·s⁻¹；对人口为 1 000 人左右丘陵地区的农村而言，可选取管径为 100~120 mm 的管道作为排水干管，充满度为 0.3~0.5，流速为 0.7~0.9 m·s⁻¹；对人口为 500 人左右山区的农村而言，可选取管径为 100 mm 的管道作为排水干管，充满度较小，为 0.1~0.2，流速较大，为 1 m·s⁻¹，必要时可采取消能措施或减少管道长度来降低流速。

参考文献

- [1] 许留云, 闫博, 李伯涛, 等. 基于Fluent的90°弯管冲蚀磨损的结构改善[J]. *化工技术与开发*, 2018, 47(10): 46-49.
- [2] 周毅, 闫光辉. 基于Fluent的混合弯管流场的数值模拟[J]. *机械设计与制造*, 2011(9): 211-213.
- [3] 高忠信, 邓杰, 葛新峰. 圆形弯管气液两相流数值模拟[J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 696-702.
- [4] 袁一星, 杨坤, 刘海星, 等. 基于Fluent的气水脉冲冲洗圆形弯管流场仿真[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(5): 61-63.
- [5] 金华市水利局. 金华市水资源公报2018[Z]. 金华, 2019.
- [6] 盐城市水利局. 盐城市水资源公报2017[Z]. 盐城: 盐城市水利局, 2018.
- [7] 丽水市水利局. 丽水市水资源公报2017[Z]. 丽水: 丽水市水利局, 2018.
- [8] 赵挺. 对苏南农村分散式生活污水处理模式的探讨[J]. *污染防治技术*, 2012, 25(4): 1-4.
- [9] 浙村整建办. 浙江省农村生活污水治理项目设计施工参照要点(试行)[Z]. 2015.
- [10] 磐秀美办. 磐安县农村生活污水治理项目设计施工指导意见[Z]. 2015.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 东南地区农村生活污水处理技术指南(试行)[Z]. 2010.
- [12] 苏伟健. 城镇污水COD浓度及其在排水管网中变化规律研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2010.
- [13] 冯华军, 冯小晏, 薛飞, 等. 浙江省典型地区生活污水水质调查研究[J]. *科技通报*, 2011, 27(3): 436-440.
- [14] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide[M]. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2018.
- [15] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows[J]. *Computers and Fluids*, 1995, 24(3): 227-238.
- [16] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3(2): 269-289.
- [17] 谢红, 孙潭, 李树平, 等. 排水箱涵气水两相流数值模拟[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(15): 82-85.
- [18] 冯静安, 唐小琦, 王卫兵, 等. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(1): 52-56.
- [19] 董亮, 刘厚林, 代翠, 等. 不同湍流模型在90°弯管数值模拟中的应用[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(12): 18-22.
- [20] 蔡小垒, 陈家庆, 刘英凡, 等. 二次旋流强化型气旋浮技术的分离特性[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(5): 1234-1244.
- [21] 茅泽育, 相鹏, 赵璇, 等. 圆形断面排水管道水力特性探讨[J]. *给水排水*, 2006, 32(7): 42-46.
- [22] 饶永超, 常凯, 王树立, 等. 90°弯管内流体流动特点数值模拟[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2016, 28(3): 65-69.
- [23] 贾兴豪, 彭向和, 龙血松. 导流板改善弯管流场的数值模拟与优化[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(3): 139-143.
- [24] 李盛元, 刘宁宁, 李勇. 流体流经垂直弯管时内部流场的数值模拟[J]. *东北电力大学学报(自然科学版)*, 2009, 29(1): 67-70.
- [25] 弋鹏飞, 张健, 苗帝. 承插式与圆弧式直角弯管的水力特性研究[C]//中国力学学会, 中国造船工程学会, 河海大学. 第二十七届全国水动力学研讨会论文集. 南京, 2015: 575-583.

- [26] 于利伟, 朱汉华, 钟骏杰, 等. 多相流试验台管道上弯管内流场分析[J]. *船海工程*, 2007, 36(2): 41-43.
- [27] 蓝立伟. 导流弯管数值模拟分析[J]. *广州化工*, 2014, 42(1): 105-106.
- [28] 湛含辉, 朱辉, 陈津端, 等. 90°弯管内二次流(迪恩涡)的数值模拟[J]. *锅炉技术*, 2010, 41(4): 1-5.
- [29] 王银亮, 艾海男, 黄维, 等. 排水管道内湍动能分布特性及影响因素[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8): 3637-3642.
- [30] 董耀华. 弯道水流的基本特性及数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 1996, 13(1): 25-29.
- [31] 袁文麒, 刘遂庆. 管道充水工况下气液两相流瞬态数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5): 709-715.
- (本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

Numerical simulation of different types of rural drainage pipeline with small diameter in plain river network area

ZHOU Liangjie^{1,2}, ZHENG Tianlong^{1,2,*}, LIU Junxin^{1,2}

1. Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author, E-mail: tlzheng@rcees.ac.cn

Abstract The discharge of rural sewage without effective treatment leads to the pollution of the rural environment. At present, most rural areas in China lack a complete sewage collection system. In rural areas where sewer systems have been laid, there were some problems such as the design of the pipe network not matching the characteristics of rural drainage, and too high construction funding of sewer systems. In order to solve these problems, the construction of sewer system with small diameter in rural area for sewage collection was proposed. The hydraulic characteristics for the rural sewer systems in the plains, hilly area and mountain area were explored, and the pipe segments were selected for numerical simulation. The results showed that the pressure change trend of part of the elbow was opposite to the velocity change trend, and the turbulent kinetic energy at the elbow was large; the design fullness of pipe in plain and hilly area was 0.3~0.9, and the design flow velocity was 0.7~0.9 m·s⁻¹. The design fullness of pipe in mountain area was 0.1~0.3, and the design flow velocity was about 1 m·s⁻¹. Research above enriched the understanding of the flow patterns of sewer systems with small diameter and provided a reference basis for more reasonable design of rural sewers and prediction of sites where risk will appear.

Keywords plain river network area; characteristics of rural drainage; drainage pipe with small diameter; multiphase flow model; numerical simulation