

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.011

基于 GIS 的污水管网易爆气体时空分布特征研究

汪宙峰^{1,2}, 徐建伟¹, 龙沁洪¹, 蒲朝东², 黄诚诚¹, 李全喜¹

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 重庆市荣冠科技有限公司, 重庆 400039)

摘 要: 针对城市污水管道爆炸、气体中毒等问题,以重庆“一小时经济圈”地区污水管网为研究对象,基于重庆市地下管网危险源物联网监测平台,通过时空模型挖掘技术与 GIS 方法,研究某小区污水管道中的易爆气体变化特征及其影响因子,同时分析了其在 2016 年—2019 年的易爆气体时空分布特征。结果表明,该小区污水管道中的易爆气体浓度峰值时间段为:02:00—04:00、07:00—09:00、15:00—17:00;根据污水来源,易爆气体浓度大小排序为:商业区 > 居民住宅区 > 公厕;易爆气体浓度受污水量和 COD 浓度的中等强度的正向影响;当温度 < 35 ℃ 时,温度越高则易爆气体浓度越大;接近检查井顶部的空间易爆气体浓度更大,且沿着污水管道呈现减小的趋势;管径越大、管龄越长,易爆气体浓度就越大;研究区域污水管道中的易爆气体浓度整体上呈现逐年降低的趋势,但在西部地区存在上升趋势;Moran's I 空间自相关分析结果显示, p 值为 0.036 8, z 得分为 2.087 6,Moran's I 指数为 0.783 8,数据呈现聚类模式,表明易爆气体浓度倾向于发生空间聚类现象。

关键词: 污水管网; 易爆气体; 时空分布; GIS; 影响因子

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0063-07

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Explosive Gas in Sewage Pipe Network Based on GIS

WANG Zhou-feng^{1,2}, XU Jian-wei¹, LONG Qin-hong¹, PU Chao-dong², HUANG Cheng-cheng¹, LI Quan-xi¹

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Chongqing Rongguan Science Technologies Co. Ltd., Chongqing 400039, China)

Abstract: Aiming at the problems of explosion and gas poisoning in urban sewage pipes, variation characteristics and influencing factors of explosive gas in underground sewage pipeline of a community in the “one-hour economic circle” area of Chongqing were investigated based on the monitoring platform of the internet of things for hazardous sources in Chongqing underground pipe network, and the temporal and spatial distribution characteristics of explosive gas from 2016 to 2019 were analyzed through temporal-spatial model mining technology and GIS method. The peak periods of explosive gas concentration in sewage pipes in this community were 02:00–04:00, 07:00–09:00 and 15:00–17:00. According to the source of the sewage, the concentration of explosive gas was ranked from large to small as follows:

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2020YFF0414359); 重庆市科技局技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2019jscx-msxmX0311)

通信作者: 汪宙峰 E-mail: wangzf@swpu.edu.cn

commercial district, residential district and public toilets. The explosive gas concentration was positively affected by sewage volume and COD. When the temperature was less than 35 °C, the explosive gas concentration increased with the temperature rise. The concentration of explosive gas in space near the top of the inspection well was higher and tended to decrease along the pipeline. The explosive gas concentration increased with larger pipe diameters and longer pipe ages. In the study area, the concentration of explosive gas showed a decreasing trend year by year, while it was an upward trend in the western region. Moran's I spatial autocorrelation analysis showed that p value was 0.036 8, z score was 2.087 6, and Moran's I index was 0.783 8. The data presented a clustering mode, indicating that the concentration of explosive gas tended to have spatial clustering phenomenon.

Key words: sewage pipe network; explosive gas; temporal and spatial distribution; GIS; influencing factor

污水管网是城市重要的基础设施,但同时也存在许多安全问题,如下水道及化粪池爆炸、气体中毒等^[1]。近年来,由于污水管道事故频发,污水管道安全问题受到了广泛关注^[2-3]。包亮^[4]开发了城市下水道及化粪池可燃气体安全监控预警系统;米莉^[5]构建了城市下水道和化粪池气体爆炸风险评估模型;孙永利等^[6]开展了居民生活污水污染物的源头产生量及规律研究;韩彩云等^[7]研究了污水处理构筑物中 H_2S 排放浓度的时间变化特征与影响因子。

虽然目前对污水管道爆炸风险评价与气体监测的研究取得了一定成果,但是对由易爆气体所引起的污水管道爆炸研究较少,而此类事故所造成的后果极为严重,故有必要掌握污水管道易爆气体的影响因子及其时空分布特征,以达到预警的目的。基于此,笔者选取重庆“一小时经济圈”地区地下污水管网易爆气体监测数据为研究对象,探究其时空分布特征,分析其影响因子,以期对污水管道安全事故预警提供有效信息。

1 试验材料与方法

1.1 数据来源与技术路线

1.1.1 数据来源

本研究所用污水管网易爆气体浓度监测数据皆

来自重庆市地下管网危险源物联网监测平台^[8],选取研究区内 12 个区县均匀分布的 107 个监测点,监测设备每隔 30 s 采集一次数据。所有人口、经济和管线统计数据皆来自重庆市统计年鉴和各区县的统计公报。气象数据下载于中国气象数据网的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。

1.1.2 技术路线

首先,通过时空模型挖掘技术对所采集到的数据进行筛选、提取与分类处理;其次,以重庆市某小区为例,探究污水管道中易爆气体在时间上的变化特征及其影响因子;再者,运用 ArcGIS 的 IDW 技术对污水管道中易爆气体在空间上的分布特征进行分析;最后,运用 ArcGIS 的 Moran's I 技术对易爆气体浓度属性进行空间自相关分析,探究其在空间上的分布模式。

1.2 研究区概况

重庆“一小时经济圈”汇聚了 2 009.89 万常住人口,占全市的 64.80%。2018 年重庆市污水管道总长达到 10 826 km,较 2016 年增长了 1 957 km;污水年排放量为 $136\,990 \times 10^4 \text{ m}^3$,较 2016 年增长了 $23\,852 \times 10^4 \text{ m}^3$;污水厂处理总量为 $130\,019 \times 10^4 \text{ m}^3$,较 2016 年增长了 $22\,115 \times 10^4 \text{ m}^3$,具体数值见表 1。

表 1 2016 年—2018 年重庆市污水管道和污水量统计数据

Tab.1 Statistics of sewage pipelines and wastewater quantity in Chongqing from 2016 to 2018

项 目	全市			市区		
	2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年
污水管道/km	8 869	9 825	10 826	7 678	8 541	9 426
污水年排放量/ 10^4 m^3	113 138	121 767	136 990	104 129	112 096	125 650
污水厂处理总量/ 10^4 m^3	107 904	115 237	130 019	99 369	106 174	119 412

1.3 研究方法

1.3.1 Pearson 相关系数

Pearson 相关系数是用于度量两个变量 X 和 Y 之间的相关性(线性相关),其值介于 $-1 \sim 1$ 之间,通常将相关强度划分为 5 个等级:极强($0.8 \sim 1.0$)、强($0.6 \sim 0.8$)、中等($0.4 \sim 0.6$)、弱($0.2 \sim 0.4$)、极弱($0 \sim 0.2$)。将监测点所测的易爆气体浓度与温度数据在 SPSS 软件上进行 Pearson 相关系数计算处理,可得到易爆气体浓度与温度间的 Pearson 相关系数。

1.3.2 IDW 插值法

IDW 插值法是基于相近相似的原理,即两个物体离得越近,它们的性质就越相似^[9]。使用 2016 年 1 月—2019 年 12 月的年均易爆气体浓度数据在 ArcGIS 软件上进行 IDW 插值处理,可以得到 4 年间的易爆气体浓度分布及变化情况。

1.3.3 空间自相关

空间自相关是指一些变量在同一个分布区内的观测数据之间潜在的相互依赖性。其中 Moran's I 是根据要素位置和要素值来度量空间自相关的一种方法,在给定一组要素及相关属性的情况下,该方法评估所表达的模式是聚类模式、离散模式还是随机模式。通过计算 Moran's I 指数值、 z 得分和 p 值来对该指数的显著性进行评估。如果数据集中的值倾向于在空间上发生聚类,则 Moran's I 指数将为正;如果高值排斥其他高值,而倾向于靠近低值,则该指数将为负。选取 107 个监测点在 2019 年的年均易爆气体浓度数据,在 ArcGIS 软件上使用 Moran's I 工具进行数据处理,可以得到 Moran's I 指数值、 z 得分和 p 值。

2 结果与讨论

2.1 时间特征分析

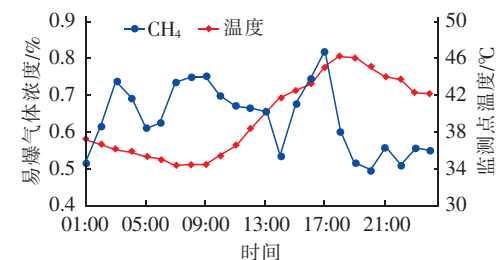
根据排污来源的不同可以将监测点所在区域划分为:商业区、居民住宅区、公厕。此处以居民住宅区为例,选择重庆某小区为研究对象,该小区有 7 栋 586 户共计约 2 200 人。小区共有 3 个监测点,监测点 A 与 C 位于住户与化粪池之间,监测点 B 位于化粪池与市政污水管道之间,具体位置见图 1。选择易爆气体浓度较高的 8 月份,依据 2019 年 8 月 2 日对 3 个监测点的所测数据进行计算处理,得到图 2。可以看出,该小区易爆气体浓度的峰值时间段主要为:02:00—04:00、07:00—09:00、15:00—17:00。

这与小区居民的日常生活用水时段息息相关,早上起床后和晚上睡觉前的如厕与洗漱,以及早、中、晚三餐的厨房污水,这些都影响着管道内易爆气体浓度的变化。

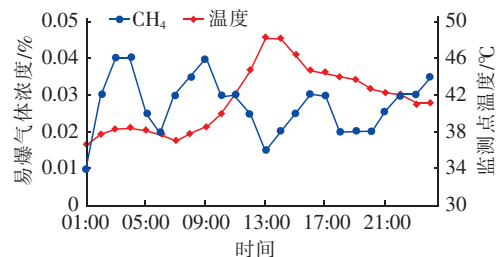


图1 监测点分布

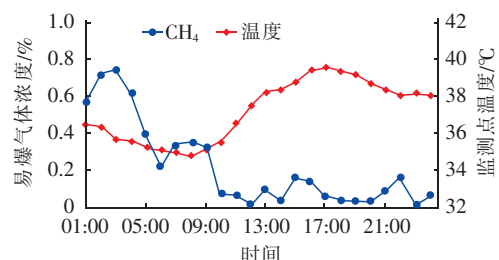
Fig. 1 Distribution of monitoring points



a. 监测点 A



b. 监测点 B



c. 监测点 C

图2 易爆气体浓度与温度的时间变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of explosive gas concentration and temperature with time

2.2 影响因子分析

通过对研究区污水管道中易爆气体浓度的监测发现,易爆气体浓度并不是稳定不变的,会因排污来源、污水量、污染物浓度、温度、检查井深度和位置、管道直径以及管龄的不同而存在较大差异。

2.2.1 排污来源

商业区的化粪池及下水道的主要排污来源是各餐饮业厨房用水和餐厨残渣;居民住宅区的排污来源则是生活污水,如从厕所、浴室、厨房等处排出的水;公厕的排污来源比较单一,主要是粪尿混合物。经研究发现,一般情况下三者的易爆气体浓度大小关系为:商业区>居民住宅区>公厕。

2.2.2 污水量与污染物浓度

污水管道中的易爆气体主要是由于污水中污染物质被分解、氧化或还原而产生的。污水管道中的污染物主要有 COD、BOD₅、NH₃-N、TN 和 TP^[6],其中又以 COD 为主。本研究以 COD 为代表进行污染物浓度研究,通过试验分析,发现同时段污水管道中

的污水量、COD 浓度以及易爆气体浓度三者的变化特征曲线比较相似,都是随着人们的生活起居和用水量的变化而产生阶段性变化。包亮^[4]的研究表明,易爆气体浓度与污水量、COD 浓度的 Pearson 相关系数分别为 0.408、0.523,由此可知,污水管道内的易爆气体浓度将受污水量和 COD 浓度的中等强度的正向影响。

2.2.3 温度因子

分析图 2 可得,监测点 B 的易爆气体平均浓度(0.03%)远低于监测点 A 的 0.65% 与监测点 C 的 0.20%,而监测点 B 的平均温度为 41.50℃,高于监测点 A 的 36.82℃ 与监测点 C 的 37.21℃。查阅资料发现,温度可能通过影响管道中厌氧细菌和产甲烷菌的活性来影响易爆气体的产生^[10]。为进一步深入研究,选择监测点 A 连续 6 d 的监测数据进行分析,根据小区的排污规律将早上 6 点至次日早上 6 点划分为一个监测日,其监测与计算结果如图 3 所示。

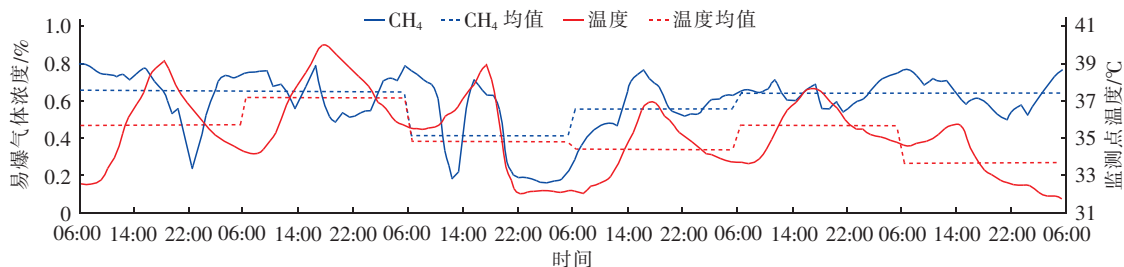


图3 监测点 A 连续 6 d 的易爆气体浓度与温度的变化

Fig.3 Variation of explosive gas concentration and temperature at monitoring point A for 6 days

第 1~6 天的易爆气体浓度与温度的显著性分别为 0.000、0.000、0.000、0.000、0.000、0.001, Pearson 相关系数分别为 -0.416、-0.628、0.726、0.758、-0.392、0.305。可以发现,第 1、2、5 天的易爆气体浓度与温度呈现负相关,且其平均温度都高于 35℃;而第 3、4、6 天的易爆气体浓度与温度呈现正相关,且其平均温度都低于 35℃。有研究表明^[11],通常情况下温度为 35℃ 时,管道中的产甲烷菌活性达到最高,对应的甲烷产量也最大;当温度超过 35℃ 时,产甲烷菌活性开始下降。由此可知:当温度 < 35℃ 时,温度越高,产甲烷菌活性越强,易爆气体浓度就越大;当温度 > 35℃ 时,温度越高,产甲烷菌活性越弱,甚至被抑制,易爆气体浓度就越小。

2.2.4 检查井的深度与位置

通过试验发现,同一个检查井内,不同深度的易

爆气体浓度不同,越接近检查井顶部的空间易爆气体浓度越大,越接近检查井底部的空间易爆气体浓度越小。这是因为易爆气体中的甲烷在水中的溶解度很小,而且密度又比空气小,所以易爆气体容易向检查井的顶部聚集。

另外,在试验中还发现,在污水管线起始端的化粪池中检测到的易爆气体浓度最高,而在污水管线末端的检查井中检测到的易爆气体浓度较低,甚至没有检测到。这是因为沿着整个污水管线,污水中的有机物含量越来越少,有机物在流动过程中逐渐被微生物降解消耗^[12],故沿着污水管道易爆气体浓度呈现减小的趋势。

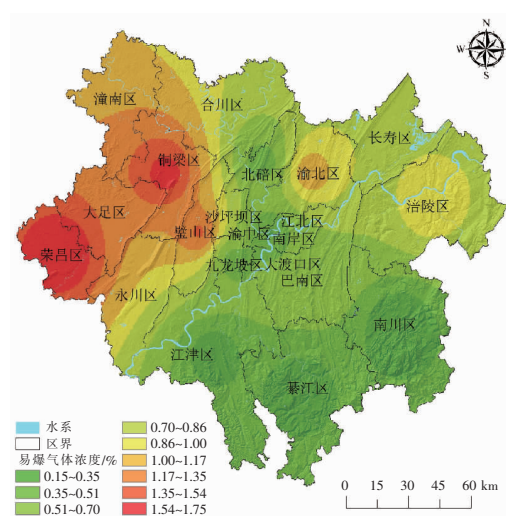
2.2.5 管道直径与管龄

管道直径越大,管道的内表面积和整个管道体积的比值就越大,就越有利于污水管道中生物膜的

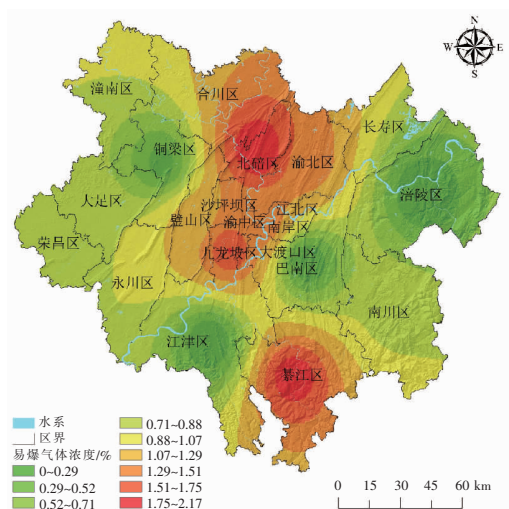
形成,从而导致易爆气体的产生量也就越大。随着管龄的增加,污水管道中的生物膜厚度、微生物种群数量、沉积物厚度等都会相应积累增加,对污水管道中易爆气体的产生也会有一定的影响。因此,污水管道的管径越大、管龄越长,管道中的易爆气体浓度就越高。

2.3 时空分布差异分析

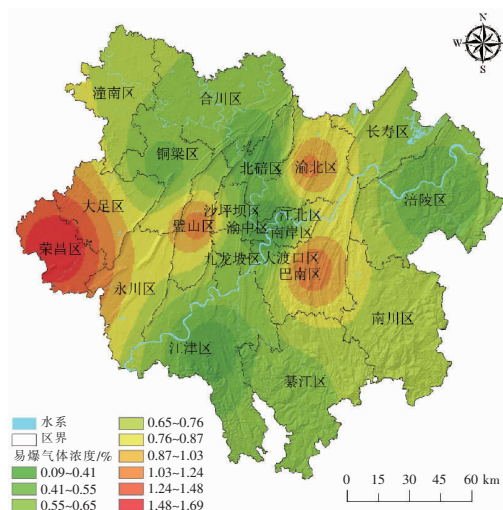
对污水管道中的易爆气体浓度年均值进行IDW插值分析,结果如图4所示,对其浓度分布情况进行特征分析^[13-14]。由图4可见,在整体上,研究区污水管道中的易爆气体浓度呈现逐年降低的趋势;在局部上,研究区的北部、中部和南部地区的易爆气体浓度逐年下降,而西部地区逐年上升,西北与东北地区存在先降后升的现象。



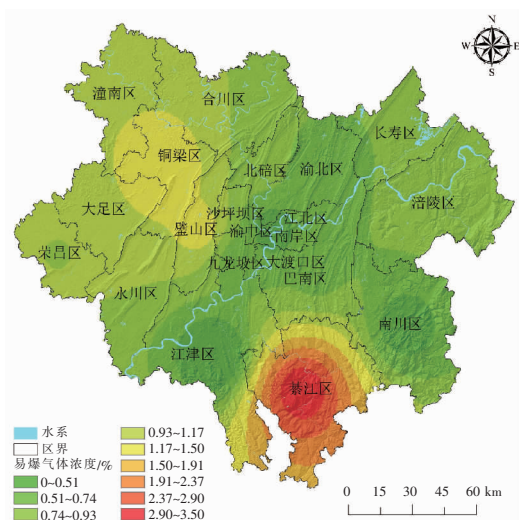
c. 2018 年



a. 2016 年



d. 2019 年



b. 2017 年

图4 2016年—2019年易爆气体浓度分布

Fig.4 Distribution of explosive gas concentration from 2016 to 2019

2.4 空间分布模式分析

采用Moran's I计算方法进行空间自相关分析,结果如图5所示。可以看出,其 p 值为0.036 8,小于0.05; z 得分为2.087 6,大于1.65;Moran's I指数为0.783 8,其数据呈现聚类模式,即随机产生此聚类模式的可能性小于5%。Moran's I指数为0.783 8,表示易爆气体浓度在空间上呈现正相关模式,且相关性强,即高值与高值发生聚集,低值与低值聚集,倾向于发生空间聚类现象。产生这种现象的原因是污水管道气相空间相同,相互贯通的管道之间发生气体的流动。若不采取措施,易爆气体产

率高的管道中的气体就会向周边管道扩散。

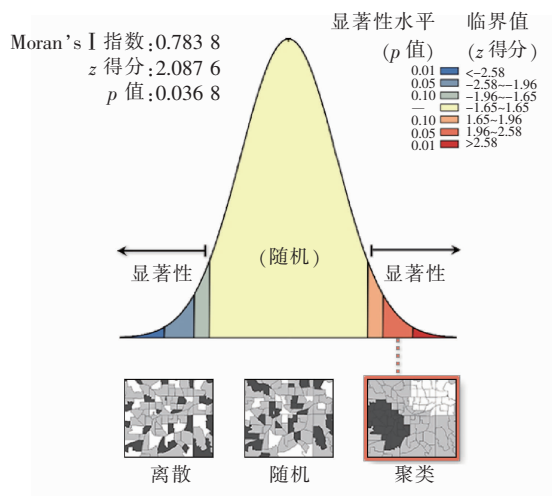


图5 Moran's I 计算结果

Fig. 5 Calculation results of Moran's I method

3 结论

① 居民住宅区的污水管道中易爆气体浓度的峰值时间段主要为:02:00—04:00、07:00—09:00、15:00—17:00。

② 一般情况下,根据污水来源的不同,污水管道中易爆气体浓度大小排序为:商业区>居民住宅区>公厕;污水管道中的易爆气体浓度会受污水量和 COD 浓度的中等强度的正向影响。

③ 当温度<35℃时,温度越高,产甲烷菌活性就越强,易爆气体浓度就越大;当温度>35℃时,温度越高,产甲烷菌活性就越弱,甚至被抑制,易爆气体浓度就越小。

④ 接近检查井顶部的空间易爆气体浓度更大,且沿着污水管道,易爆气体浓度呈减小的趋势;管径越大、管龄越长,管道中易爆气体浓度就越高。

⑤ 重庆“一小时经济圈”污水管道中的易爆气体浓度整体上呈现逐年降低的趋势,西部地区存在上升的趋势;Moran's I 空间自相关分析结果显示,p 值为 0.036 8,z 得分为 2.087 6,Moran's I 指数为 0.783 8,数据呈现聚类模式,表明易爆气体浓度倾向于发生空间聚类现象。

参考文献:

[1] 闫森,丁艳萍,郑才林,等. 污水管道危害性气体浓度分布模型扩展与验证[J]. 环境工程学报,2019,13(5):1228-1236.
YAN Sen, DING Yanping, ZHENG Cailin, et al.

Extension and validation of the model of hazard gas concentration distribution in sewer[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2019,13(5):1228-1236 (in Chinese).

[2] 王泽根,陈勇,甄艳,等. 地下管线监测与城市发展适应性分析[M]. 北京:科学出版社,2017.

WANG Zegen, CHEN Yong, ZHEN Yan, et al. Underground Pipeline Monitoring and Urban Development Adaptability Analysis [M]. Beijing: Science Press,2017 (in Chinese).

[3] 张倩. 城市污水管道风险评估与污水泵站优化运行研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.

ZHANG Qian. Research on Risk Assessment of Urban Sewage Pipeline and Optimal Operation of Sewage Pumping Station [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2019(in Chinese).

[4] 包亮. 城市下水道及化粪池可燃气体监控预警系统研制与应用[D]. 重庆:重庆大学,2009.

BAO Liang. Development and Application of the Monitoring and Early Warning System for Urban Sewer & Septic Tank Combustible Gas [D]. Chongqing: Chongqing University,2009(in Chinese).

[5] 米莉. 城市下水道和化粪池气体爆炸风险评估与预警机制研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.

MI Li. Study on Risk Assessment of Gas Explosion and Mechanism for Early-warning of Urban Sewers and Septic Tank [D]. Chongqing: Chongqing University,2010 (in Chinese).

[6] 孙永利,张维,郑兴灿,等. 城镇居民人均生活污水污染物产生量测算之产污规律[J]. 中国给水排水,2020,36(6):1-6.

SUN Yongli, ZHANG Wei, ZHENG Xingcan, et al. Emission regularity of daily domestic sewage pollutant production of urban residents per capita [J]. China Water & Wastewater,2020,36(6):1-6 (in Chinese).

[7] 韩彩云,张晶宇,丁永伟,等. 曝气沉砂池 H₂S 排放浓度的时间变化与影响因子[J]. 中国给水排水,2020,36(7):74-77.

HAN Caiyun, ZHANG Jingyu, DING Yongwei, et al. Temporal variation characteristics and influencing factors of H₂S emission concentration in aerated grit chamber [J]. China Water & Wastewater,2020,36(7):74-77 (in Chinese).

[8] 庞吉敏,蒲朝东,王文和,等. 城市地下污水管线安全监控及智能处置系统开发与应用[J]. 给水排水,2018,44(3):127-130.

- PANG Jimin, PU Chaodong, WANG Wenhe, *et al.* Development and application of safety monitoring and intelligent disposal system for urban underground sewage pipeline[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44 (3): 127–130 (in Chinese).
- [9] 白杨, 杨剑, 陈鹏, 等. 基于空间插值的西安市重空气污染期间主要污染物时空变化特征及相关性分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(4): 809–819.
- BAI Yang, YANG Jian, CHEN Peng, *et al.* Spatiotemporal characteristics and relationships of the main air-pollutants during a typical heavy air pollution in Xi'an City based on a spatial interpolation method[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33 (4): 809–819 (in Chinese).
- [10] 武福平, 薛博, 谭珍珍, 等. 短HRT下AF深度处理城市污水快速启动实验[J]. *工业水处理*, 2013, 33(9): 53–55.
- WU Fuping, XUE Bo, TAN Zhenzhen, *et al.* AF rapid start-up experiment on the advanced treatment of urban sewage under natural temperature and short HRT conditions[J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33 (9): 53–55 (in Chinese).
- [11] 方德琼. 山地城市污水管道中有害气体的检测及分布规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- FANG Deqiong. Study on Detection of Harmful Gases and Distribution Law in the Mountain City Sewage Pipeline[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012 (in Chinese).
- [12] 张远. 城市污水管道甲烷检测与运移聚集规律研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
- ZHANG Yuan. Study on Methane Detection, Migration and Accumulation in Urban Sewage Pipeline [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016 (in Chinese).
- [13] 咸龙, 巨天珍, 陈雪萍, 等. 近三年中国甲醛时空分布特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(6): 1886–1894.
- XIAN Long, JU Tianzhen, CHEN Xueping, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of formaldehyde in China in recent three years[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39 (6): 1886–1894 (in Chinese).
- [14] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 长三角城市群臭氧浓度的时空分异及驱动因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1434–1445.
- HUANG Xiaogang, SHAO Tianjie, ZHAO Jingbo, *et al.* Spatio-temporal differentiation of ozone concentration and its driving factors in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(6): 1434–1445 (in Chinese).

作者简介: 汪宙峰(1983–), 男, 安徽东至人, 博士(后), 副教授, 主要从事地理空间人工智能、智慧城市地下管网安全监测、智慧油气田等方面的教学与科研工作。

E-mail: wangzf@swpu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-25

修回日期: 2020-09-21

(编辑: 刘贵春)

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次