

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.021

昆明排水管网在线液位监测网络建设及数据应用

王剑锋¹, 黄微¹, 姚远¹, 李春艳¹, 王欢¹, 李萌², 张旭东²

(1. 昆明排水设施管理有限责任公司, 云南 昆明 650034; 2. 北京清环智慧水务科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 在对昆明排水管网运行管理需求分析的基础上, 筛选长期固定及临测点, 构建在线液位监测网络体系。从预警预报、旱天液位规律、雨天液位响应以及上下游联动 4 个方面进行液位数据分析及应用模式探讨, 从而指导排水设施运行维护、划分区域溢流风险等级、识别水位变化规律、进行异常排水事件溯源、评估雨天溢流风险及分析上下游连通管道液位相关性。利用液位监测数据指导排水设施运行管护, 提升城市排涝应急响应能力, 为其他城市构建液位监测网络、排水设施智能化运行管理提供了经验。

关键词: 排水管网; 液位监测; 液位数据分析; 预警预报

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0131-06

Construction and Data Application of Online Liquid Level Monitoring System in Kunming Drainage Network

WANG Jian-feng¹, HUANG Wei¹, YAO Yuan¹, LI Chun-yan¹, WANG Huan¹,
LI Meng², ZHANG Xu-dong²

(1. Kunming Drainage Facilities Management Co. Ltd., Kunming 650034, China; 2. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech Co. Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: Based on analysis of the operation and management requirements of Kunming drainage network, long-term fixed and temporary measuring points were selected to construct an online liquid level monitoring system. Liquid level data analysis and application mode were discussed from four aspects (warning and forecasting of water level, variations in liquid level in dry weather, response of liquid level in wet weather and relationship of upstream and downstream level), so as to guide the operation and maintenance of facilities, divide the risk level of different area, identify the law of water level change, trace the source of abnormal drainage events, assess the overflow risk in wet weather and analyze the correlation of liquid levels in upstream and downstream connected pipelines. The liquid level monitoring data can be employed to guide the operation and management of drainage facilities, improve emergency response capability of urban drainage, which provides experience for other cities to build liquid level monitoring network and realize intelligent management of drainage facilities.

Key words: drainage network; liquid level monitoring; liquid level data analysis; warning and forecasting

通信作者: 张旭东 E-mail: zhangxd@thuwater.com

随着城市排水系统逐步建设,排水管网也逐渐庞大和复杂,作为城市最基本的保障设施,为了保障其发挥重要作用,提升排水设施运行效益,改善排水系统旱季排水不畅,避免内涝或溢流事故的发生,缩短内涝或溢流事故的时间,应对暴雨频发导致的在汛期发生“水浸”“内涝”等事件,对排水管网运行和养护管理的要求也日益提高^[1]。基于物联网传感技术、移动互联传输技术、GIS 技术等,结合管理部门对在线监测和预警体系的建设要求,多个城市已开展城市排水管网智慧化管理,建立了排水管网的监测和预警体系,实现了对城市排水管网多点实时监测和对内涝提前预警预报^[2]。

昆明市排水泵站、调蓄池等设施存在部分智能化液位监测设备,但监测体系不完备,缺失系统性的监测数据,很难实现有效的预警预报,监测数据分析简单,缺乏规律性识别和系统性分析,很难为运行管理和规划建设提供数据支持^[3]。在原有液位监测设备基础上,梳理运维人员在管网运行和管护中的实际需求,筛选出关键节点构建在线液位监测网络,补充建设排水管网在线监测能力。收集排水系统现状过程数据,分析旱季、雨季液位运行状况,对内涝等事件进行提前预警预报,为后续管网的及时修复与整改、降低管网的运行水位实现正常运行提供数据基础。本研究基于昆明排水系统在线液位监测网络建设实践,阐述了在线监测网络构建过程及液位监测数据分析的应用模式。

1 监测网络建设

1.1 技术路线

在线液位监测网络的构建通常按照如下工作步骤:整理现有智能化液位监测设备、识别现状监测需求、筛选监测点和安装设备、分析数据优化监测点位。技术路线如图 1 所示。首先,汇总各排水系统分区内现状液位设备分布以及可用性情况,包括调蓄池及泵站等排水设施内液位设备。其次,收集各排水设施运营分公司以及泵站分公司在实际运行管理过程中发现的问题和管护需求。根据排水管网现状 GIS 数据,分析排水管网的拓扑结构以及管网间关联特点,结合淹积水图,闸、泵等排水设施,合理选择监测区/段,初步制定监测点方案。结合现场勘查,进一步确定满足监测设备安装要求的监测点,在选定的监测点安装液位监测设备,收集在线液位监测数据^[4]。之后,对监测设备取得的数据进行分析

判别,识别在旱季和雨季没有溢流风险的点位,筛选出需要长期固定的监测点位,同时根据业务需求,提出需要轮换监测的点位。结合雨季的实际管理运维需求,在雨季到来前,将可轮换点的监测设备优化到排水管网主干管及各片区易涝区域,提供实时动态液位数据,把握排水管网水位变化情况,为内涝、溢流等提供及时预警预报。在这一过程中,逐步优化排水管网监测点位,构建在线液位监测的“监测一张网”体系。

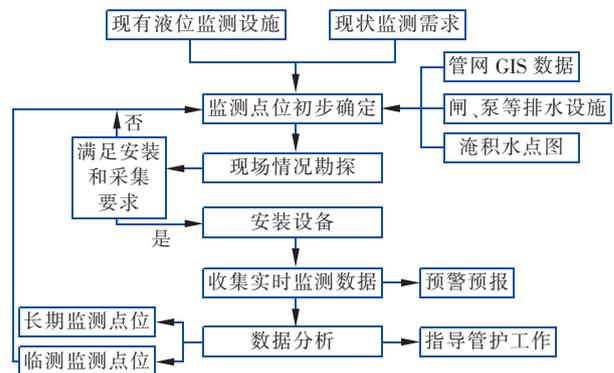


图 1 在线液位监测网络构建技术路线

Fig. 1 Technical route for online liquid level monitoring network construction

通过整体监测网络的实施运行,可采集到大量高质量监测数据。基于数据分析,可对各片区排水系统在旱天和雨天的运行情况进行诊断,准确反映排水系统存在的运行风险,并通过采取相关措施,预防事故的发生,提高系统运行的可靠性。

1.2 布点方案

收集排水设施管理公司各运营维护分公司及泵站分公司相关业务管理需求,结合已有经验,液位监测设备布设主要依据以下原则:①具有代表性,能代表监测范围内排水系统的液位运行情况,同时反映周边路段积水情况;②具有覆盖性,避免出现大片监测盲区的情况;③满足设备安装要求,方便日常的保养维修、维护;④具有系统性,能实现运行水位调控调度和上下游联动分析。

基于以上布点原则,结合管网 GIS 数据和易涝点分布图,在主城排水系统内分期进行在线液位监测网络构建(见图 2),共布设了 101 台 THWater TWP 型号的在线液位监测设备,包括积水和溢流监测 34 个、运行水位监测 63 个、河道水位监测 4 个。THWater 智慧排水监测液位仪(型号:TWP)是专门用于排水管网运行规律及风险预警监测的在线液位

计,设备采用超声波和压力双探头冗余监测,避免测量盲区,保证测量的准确性。在通讯上采用分体式设计,保证了数据的实时传输,同时通过模具设计,保证设备的防潮防水防爆性能,能在复杂的排水管网情况下长期稳定运行,具备软硬一体、即装即用、智能在线、云端管理的特点。

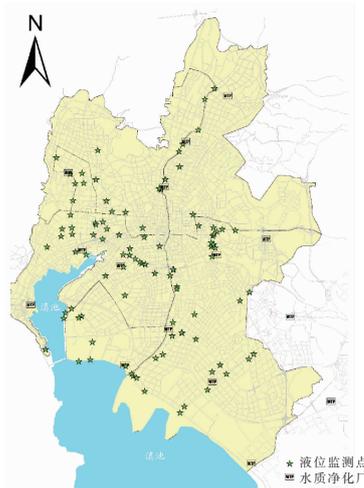


图2 监测点位分布

Fig.2 Distribution of monitoring points

2 监测数据应用及分析

2.1 预警预报应用及分析

在液位监测设备安装过程中,需要对每一个监测点进行监测点位高程和井盖距底部高度的测量,结合运营管理需求和现场所处功能区域实际情况,合理设置预警、报警、溢流水位线,为运行风险管理提供数据指导和报警依据,并在数据系统上实时展示监测点位数据详情,包括距离井底液位、液位标高、距离溢流液位等。通过图3所示的雨水泵站上游的监测点,泵站值守人员通过分钟级数据实时反馈,获取水位现状信息,及时发现。在2019年6月12日19:00后液位迅速上升,并于19:20左右超过预警线且将要超过报警线时,及时将雨水泵站开泵,加大输水量,从而避免了由于降雨导致的溢流事件的发生。

在2019年6月13日17:00也发生了类似的报警事件,同样及时采取了有效的处理措施。这种基于分钟级液位的报警和反馈处理机制,可以使得泵站人员及时了解上游管网的运行风险和存在问题,及时采取有效的处理措施,并通过数据跟踪处理后的效果,对处理策略进行及时的修正或调整,避免溢流事故的发生。

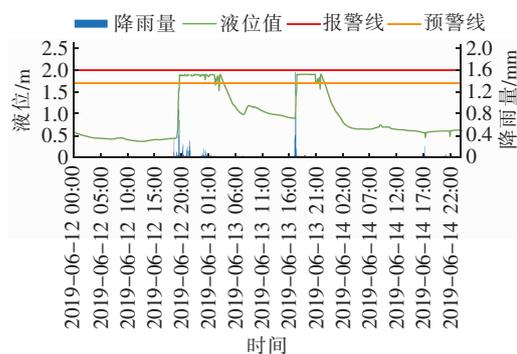


图3 雨水泵站上游监测点液位变化曲线

Fig.3 Liquid level curve of upstream monitoring point of rainwater pumping station

经过2018年5月1日—11月1日的液位数据收集,34个积水及溢流监测点位共采集了900.8万条数据,可用于这段时间内排水管网运行风险和负荷的总体分析评估。通过统计分析发现共有5处点位超过溢流线、8处点位超过报警线、10处点位超过预警线。总结各分公司内涝风险应急响应管理的实践,根据水位是否超过溢流线、报警线和预警线以及超过部分所占时长,将以上10个点的风险等级分为高、较高和中风险,具体划分标准如表1所示。根据水位风险等级划分依据得到如图4所示等级划分结果,对不同等级区域实行分级管控。

表1 水位风险等级划分

Tab.1 Water level risk classification

水位线位置	所占时长/%	风险等级
溢流线	>0	高
报警线	>5	高
预警线	>50	高
报警线	≤5	较高
预警线	5~50	较高
预警线	≤5	中

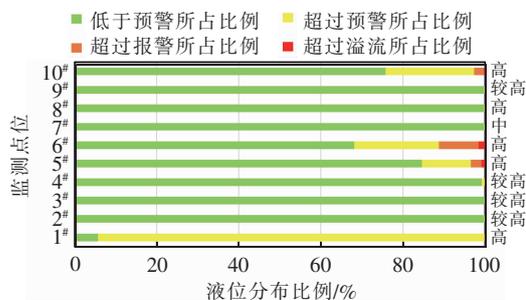


图4 监测点位的液位分布对比

Fig.4 Comparison of water level distribution of monitoring points

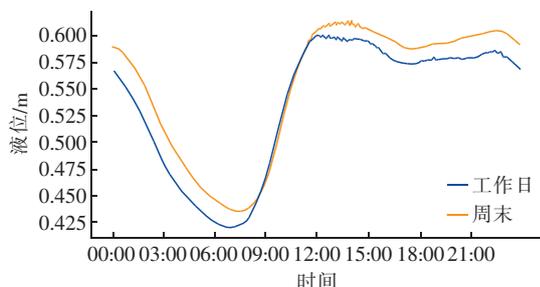
对高风险的5个监测点位(1[#]、5[#]、6[#]、8[#]、10[#])

区域实行Ⅰ级应急响应管理,同时在该监测点上下游分别增加1台监测设备,提高该区域监测能力,根据实时液位数据反馈情况重点关注该区域溢流风险,提前做好应对方案。对较高风险的4个监测点位(2#、3#、4#、9#)区域选择合适位置增加1台监测设备,实行Ⅱ级应急响应管理。对中风险的监测点位(7#)区域进行持续长期监测,及时提供水位预警预报信息。对于水位长期未超过预警线且溢流风险低于50%的监测点位,按照雨季应急响应的实际需求,将其监测设备轮换至Ⅰ级、Ⅱ级易涝区域,为雨季内涝、溢流风险管理提供实时动态数据。

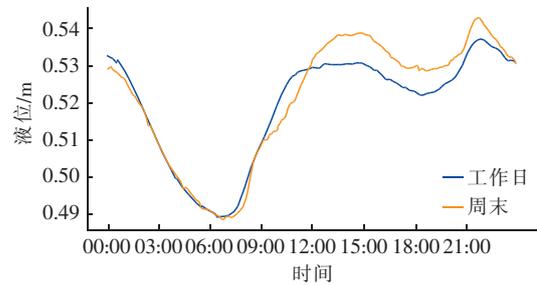
2.2 旱天运行规律分析

由于各监测点位所服务的范围、人口、用地类型短时间内不会发生剧烈变化,因此在没有降雨的情况下,液位通常会呈现特定的旱天运行规律。收集至少2周以上的旱天数据,识别监测点位处液位旱天运行规律,通过每日数据对比,可识别异常排水情况,从而对排水异常的原因进行溯源,对堵塞、偷排等事件进行及时处理。

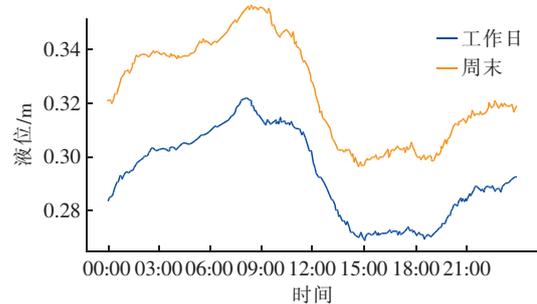
选择截污干管和干渠、泵站上游管道以及进厂主干管处监测数据进行液位数据聚合分析,结果如图5所示。由5(a)、(b)可知,由于截污渠和截污管主要收集生活污水,故旱天液位规律曲线基本一致,周末和工作日差异不大,在早上07:00处于最低值,之后随着生活用水量增加而水位逐步升高,到中午和夜晚有两个因用水高峰导致的液位曲线高峰。由图5(c)可知,泵站上游监测点位由于受到“泵站晚上不运行、白天运行”的影响,存在凌晨水位涌高,09:00开启泵站之后水位逐渐下降,显示出与生活服务区不一样的规律曲线。由图5(d)可知,进厂主干管监测点位水位在早上07:00存在较低的位置,由于上游服务片区较大,超过500 hm²,污水会经过较长时间转输和汇流,水位在白天呈现逐步上升趋势直到夜晚用水高峰。



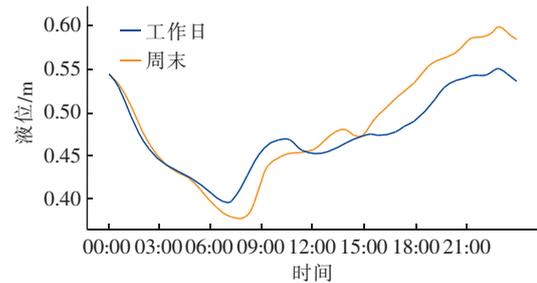
a. 截污渠监测点位旱天液位规律曲线



b. 截污管监测点位旱天液位规律曲线



c. 泵站上游监测点位旱天液位规律曲线



d. 进厂主干管监测点位旱天液位规律曲线

图5 各监测点位的旱天液位规律曲线变化

Fig. 5 Liquid level curve in dry weather of different monitoring points

通过2019年5月1日—6月31日共62 d的液位监测数据聚合分析,得到南片区红塔西路污水主干管监测点位旱天液位规律曲线,如图6所示。在运行管理中发现,6月份出现多天液位异常曲线,以6月9日为例,对比6月9日现状液位数据曲线和旱天液位规律曲线,发现该处分别自凌晨02:00和下午15:00开始有明显的液位增长趋势,液位峰值分别增长了49.1%和19.4%。通过现场排查,发现该监测点位于地铁站施工工地下游。施工场地处于地下水水位较高区域,在施工作业时,将水通过附近的污水检查井抽至污水管道,导致下游水位出现异常增高现象。

通过该案例可以看出,对旱天水位的异常变化进行识别,可以找到管网运行的风险点,通过及时排查,找到造成运行风险的原因并进行及时整改,从而

避免外部因素导致的排水管网运行风险增加,保障排水管网的安全稳定运行。

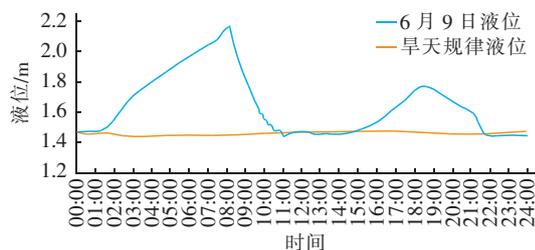


图6 旱天液位异常曲线识别

Fig. 6 Identification of abnormal liquid level curve in dry weather

2.3 降雨响应分析

在降雨过程中,排水系统内液位上涨趋势和幅度受到不同降雨条件的影响,赵冬泉等提出了液位增高面积(单位: $m \cdot \min$)指标,用来研究降雨量对管网中液位的影响,结果表明降雨量与液位增高面积呈显著的正相关关系^[5]。在内涝应急预警工作中,液位峰值数据能为内涝或溢流事件提供及时有效的预警预报信息,因此本研究探讨了降雨对液位峰值的影响。选择泵站上游主干管监测点,收集同期降雨数据,划分不同降雨事件,统计总降雨量,同时以在降雨期间的峰值液位与降雨事件发生前液位间的差值作为液位增加值。对多场降雨下的降雨量和液位增加值进行对数拟合,拟合方程为 $y = 1.6508 \ln x - 3.5644$ (x 为降雨量、 y 为液位增加值), R^2 达到 0.9631,拟合程度较好。通常随着降雨量的增大,泵站抽排量将相应增加,从而对液位峰值起到一定的缓解作用。该监测点位平均旱天液位为 0.168 m,距离溢流口有 4.282 m,利用拟合公式估算发生 115 mm 降雨时该处会发生溢流。从该监测点的分析可以看出,对降雨量和液位增加值的关系进行研究,可以帮助管理者预测该点可能发生溢流时对应的降雨量。通过对研究区每个易涝点的分析,可以确定各个易涝点可能发生溢流的降雨条件,便于根据天气预报或实测降雨量进行各个易涝点的布防布控,辅助进行排水管网的应急管理。

2.4 上下游连通分析

在第二水质净化厂系统内有两路进水主干管 L1 和 L2,通过四通井闸门调度,污水优先进入污水处理厂,余下污水通过下游转输管道 L3 转输至下游污水处理厂系统。为了分析闸门调度的合理性和上下游节点连通关系的匹配性,评估上下游液位变化

的联动关系,在上游和下游主干管分别布设 1 台液位监测设备。

提取 2019 年 4 月 22 日—6 月 18 日的 3 个监测点的连续液位监测及同步雨量监测数据(见图 7),可以看出降雨对液位变化规律有较大的影响,因此基于降雨数据将液位数据划分为旱天数据和雨天数据。数据相关性分析结果如表 2 所示。

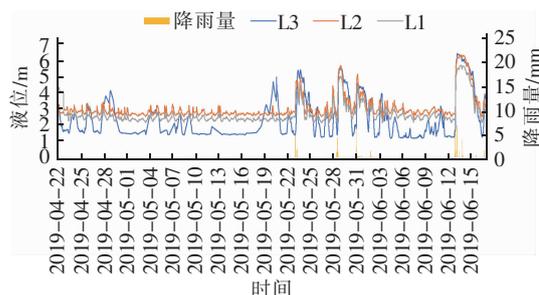


图7 上下游液位数据变化

Fig. 7 Liquid level curve of upstream and downstream monitoring points

表2 上下游监测点位的液位相关性

Tab. 2 Correlation of liquid level between upstream and downstream monitoring points

监测点位		L1	L2	L3
全部	L1	1.000	0.967	0.783
	L2	0.967	1.000	0.800
	L3	0.783	0.800	1.000
旱天	L1	1.000	0.984	0.121
	L2	0.984	1.000	0.144
	L3	0.121	0.144	1.000
雨天	L1	1.000	0.998	0.873
	L2	0.998	1.000	0.867
	L3	0.873	0.867	1.000

上游进水主干管监测点 L1 和 L2 液位数据总体相关性高达 0.967,旱天和雨天数据相关性分别为 0.984、0.998,液位变化规律呈现高度一致,说明上游服务片区排水体制和土地利用类型相似,排水主干管液位运行规律一致。上游监测点 L1、L2 与下游监测点 L3 液位数据总体相关性分别为 0.783 和 0.800,旱天 L1、L2 与 L3 液位数据相关性为 0.121、0.144,雨天的相关性为 0.873、0.867,可知在旱天,通过四通井闸门控制,大部分污水优先进入污水处理厂进行处理,余下部分进入下游转输管道,故 L3 液位受到剩余小部分水量影响,与上游来水规律存在差异,相关性较低。当降雨发生时,上游服务片区内汇入大量雨水,大部分急增水量通过四通井转输

到下游管道,导致上游和下游转输管道内液位数据具有较高的相关性。在雨季通过上游水位实时监测,可实现上下游联合预警预报。

3 结论

基于昆明市排水系统运行管控实践需求,筛选长期固定和临测点位,完善排水系统液位监测网络,构建在线液位监测体系,提升了排水设施智能化运行管理水平。通过预警预报、旱天规律、雨天响应以及上下游连通分析,实现了通过液位数据指导排水设施运行,并通过溢流风险等级区域划分,实现了分层次风险管理。通过预测不同监测点位发生溢流时对应的降雨量,可指导运营人员提前做好相应准备,避免或减少溢流事件的发生,提升了对排水管网事故的预警和处理能力。对于通过液位监测发现的问题严重区域,有必要增加在线流量计等监测设备,定量识别片区的污水产生量,为管网养护以及后续的修复整改提供定量化的支持。

参考文献:

- [1] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水,2013,29(16):13-19.
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, *et al.* Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(16):13-19 (in Chinese).
- [2] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 监测技术在排水管网运行管理中的应用及分析[J]. 中国给水排水,2012,28(8):11-14.
ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, *et al.* Application and analysis of monitoring technology in operation and management of urban drainage network[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(8):11-14 (in Chinese).
- [3] 郭效琛,李萌,史晓雨,等. 基于在线监测的排水管网事故预警技术研究与应用[J]. 中国给水排水,2018,34(19):129-133.
GUO Xiaochen, LI Meng, SHI Xiaoyu, *et al.* Research and application of warning technology for drainage network accidents based on on-line monitoring[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(19):129-133 (in Chinese).
- [4] 毛建军,毛楠,王浩正,等. 宜兴市污水管网在线流量监测分析[J]. 给水排水,2012,38(S2):210-212.
MAO Jianjun, MAO Nan, WANG Haozheng, *et al.* Online flow monitoring and analysis of sewage pipeline network in Yixing[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(S2):210-212 (in Chinese).
- [5] 赵冬泉,李雪森,唐兰贵,等. SmartWater 智能在线液位监测预警系统介绍及应用[J]. 给水排水,2015,41(9):95-100.
ZHAO Dongquan, LI Xuesen, TANG Langui, *et al.* Introduction and application of SmartWater intelligent online level monitoring and warning system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(9):95-100 (in Chinese).

作者简介:王剑锋(1989-),男,甘肃酒泉人,本科,助理工程师,昆明排水设施管理有限责任公司信息技术服务中心副经理,负责昆明市公共排水设施基础数据管理和管网信息系统建设工作,具有多年管网数据管理、监测及分析诊断经验。

E-mail:511864047@qq.com

收稿日期:2020-01-20

修回日期:2020-03-23

(编辑:任莹莹)

弘扬宪法精神,树立宪法权威