

城市供水管网极端寒潮灾害影响特征与设防标准

胡群芳^{1,2}, 车德路³, 宋朝阳⁴, 王 飞^{1,2}, 方宏远⁵, 赫 磊⁶, 朱慧峰⁷

(1. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092; 2. 城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 4. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082;
5. 郑州大学黄河实验室(郑州大学), 河南 郑州 450001; 6. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092;
7. 上海市供水管理事务中心, 上海 200081)

摘要: 近年来随着全球气候变化, 城市遭遇极端寒潮灾害频发, 经常对城市关键基础设施大型供水管网造成破坏。为此, 以上海市为例, 研究城市供水系统寒潮灾害影响规律及设防标准, 通过对上海市 2020 年底到 2021 年初的极端寒潮事件进行研究, 分析寒潮过程中供水系统压力、流量、管道维修以及其他供水设施功能受损情况。结合近 60 年的气象资料, 对上海市历年气象寒潮事件进行统计分析, 给出当日最低温度、24h 降温、48h 降温、72h 降温、过程最低温度及持续时间 6 个寒潮特征指标的分布规律。同时, 利用泊松分布计算了上海市年最低温度的重现期和超越概率, 提出了水表等外露设施的温度设防建议标准, 并针对气温数据和管道维修数据进行关联性分析, 从维修率的角度识别对管道运行造成不利影响的温度基准。研究结果可为长三角地区城市供水行业安全运行与灾害防控提供理论和技术参考。

关键词: 供水管网; 气象灾害; 寒潮特征; 重现期; 设防标准
中图分类号: TU99 **文献标志码:** A

Impact Characteristics and Fortification Standards of Cold Wave Disasters in Urban Water Supply Systems

HU Qunfang^{1,2}, CHE Delu³, SONG Zhaoyang⁴, WANG Fei^{1,2}, FANG Hongyuan⁵, HE Lei⁶, ZHU Hui Feng⁷

(1. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Urban Safety Risk Monitoring and Early Warning of the Ministry of Emergency Management, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 5. Yellow

River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 6. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 7. Shanghai Water Supply Management Center, Shanghai 200081, China)

Abstract: The cold wave disaster impact law and fortification standards of urban water supply system were studied in Shanghai as an example. First, the extreme cold waves in Shanghai from the end of 2020 to the beginning of 2021 were studied, focusing on the analysis of water supply system pressure, flow, pipeline maintenance, and other water supply facility function damages during cold waves. Using the meteorological data of the past 60 years, the statistical analysis of meteorological cold wave events in Shanghai over the years was conducted, and the distribution patterns of six cold wave characteristic indicators, i. e., the minimum temperature of the day, 24h cooling, 48h cooling, 72h cooling, process minimum temperature, and duration, were given. The Poisson distribution was used to calculate the recurrence period and the probability of exceeding the annual minimum temperature in Shanghai, and the recommended standards for temperature setting of exposed facilities such as water meters were given. The correlation analysis was performed by temperature data and pipeline maintenance data, and the temperature benchmarks that adversely affect the operation of pipelines were identified from the perspective of maintenance rate. The research results of this paper can provide theoretical support for the safe operation and management of the water supply industry in Shanghai.

Key words: water supply network; meteorological

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3801000); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1201200); 国家自然科学基金(51878510); 国家重点研发计划(2016YFC0802400)

第一作者: 胡群芳(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市市政管网运行安全与防灾、土木工程风险分析与评估。E-mail: huqunf@tongji.edu.cn

通信作者: 王 飞(1985—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市基础设施风险智慧感知与灾害防控。E-mail: wangf@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

hazards; cold wave characteristics; recurrence period; fortification standards

近年来,受全球气候变化的影响,人们普遍预计极端天气将变得更加常见^[1]。城市基础设施作为保障城市正常运行和健康发展的物质基础^[2],在极端气候条件下的运行安全保障能力和防灾能力及水平至关重要^[3]。为此,城市供水管网是城市关键基础设施和重要生命线^[4],其受冬季低温影响更为显著^[5],尤其气候下引起的寒潮灾害导致破坏更为剧烈。如2016年1月上海市遭遇35年来最强寒潮侵袭,造成DN500以上大口径管损事件46起^[6],累计修复水表约18万件;2021年初上海市连续遭遇两轮“霸王级”寒潮,期间造成DN500以上大口径管损事件70起,累计修复水表超4万件^[7]。根据气象数据统计,近20年来,上海冬季极端低温天气的发生率呈现增强、加剧趋势,即寒潮发生频率提高,单次寒潮的持续时间延长、最低温度降低。因此,保障供水系统在寒潮期间的运行安全成为政府部门和企业共同关注的焦点问题之一。

极端低温冰冻影响被广泛认为是产生管道损坏故障的重要因素^[8]。当季节性温度下降时,管道损坏的频率会显著增加^[9],每年约60%的管损事件量与低温的频率和强度有关^[10]。冬季最高的故障率通常与第一次冬季霜冻有关,但如果低温峰值进一步下降,第一次霜冻后的故障率也会继续增加^[11]。管道周边地层中土体水分的冻结和膨胀对管道施加额外的应变,被认为是主要诱发因素^[12]。对于冬季寒潮的影响,我国部分学者从可靠度角度^[13-14]出发,开展了寒潮管损调查^[15]以及极端低温对水表影响^[16]等方面研究。

尽管低温冻结对供水系统的影响已逐步得到国内外学者的日益关注,但目前寒潮对城市供水管网灾害破坏研究依然较为分散,且较多停留在现象学阶段,尤其缺乏对寒潮基本特征、温度在土壤中的传导过程及其供水系统的影响规律和寒潮设防标准等关键问题的研究。为此,以上海市供水系统为例,重点研究寒潮过程对城市供水系统的影响规律,并提出相应的设防标准,为系统抗灾能力提升和更新改造提供科学依据。

1 供水管网极端寒潮灾害分析

以上海市2020年底至2021年初的2轮寒潮过程为例,从供水压力、流量、管道维修等角度分析寒

潮期间供水系统的状态变化过程,揭示寒潮对供水系统影响的一般规律。

1.1 数据来源

所用的数据包括上海市气象数据、供水管网压力流量数据、管网管损数据以及埋地管道温度监测数据(埋深分别为180 cm和250 cm)。数据分别来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)^[17]公开的上海气象数据、上海市供水管理部门以及现场管网埋地管道管顶土壤温度监测,其中,上海气象站包括浦东新区站点(代号583211)、宝山区站点(代号583620)和闵行区站点(代号583670)。

1.2 两轮寒潮过程

2020年底至2021年初上海市连续遭遇了2轮“霸王级”寒潮,温度变化过程如图1所示。第1次寒潮从2020年12月29日持续到2021年1月4日,共7d。寒潮来临时伴随降雨,最大小时降雨量为1.4mm,期间有连续4天最低气温低于0℃。在温度下降过程中,气温在48h内从17℃降至-6.5℃,降低23.5℃;在温度恢复过程中,气温在96h内从-6.5℃升至14℃,升高20.5℃。

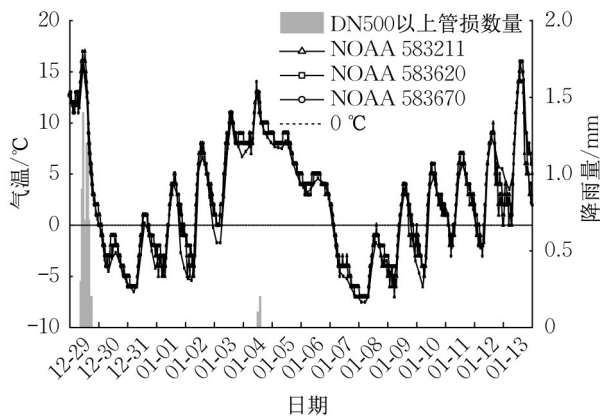


图1 2次寒潮气温变化过程

Fig. 1 Temperature change process of two cold waves

第1次寒潮结束后,上海马上遭遇了第2次寒潮。从2021年1月5日到2021年1月13日,寒潮持续了9d,降温初期伴有零星降雨,期间最低温度连续6d低于0℃。在温度下降过程中,气温在72h内从9℃降至-7.5℃,降低16.5℃;在温度恢复过程中,气温在144h内从-7.5℃升至16℃,温度升高23.5℃。

1.3 极端寒潮对供水系统的影响

从3个方面分析寒潮对上海市供水系统的影响,包括供水压力、供水流量和供水管道的影响。压力流量数据来自上海主要地区的840个压力测量点和40个流量测量点,数据采样频率为1次·h⁻¹。供水

管网管损数据来源于供水管理部门。

1.3.1 对供水压力的影响

上海主要地区 840 个监测点的平均压力和气象温度的变化如图 2 所示。根据寒潮前 28d 的压力记录,正常情况下的最高和最低平均压力分别为 245.5kPa 和 220.4kPa。在第 1 次寒潮影响期间,最高和最低平均压力分别降至 240.3kPa 和 202.0kPa,下降了 2.1% 和 8.3%。在第 2 次寒潮影响期间,最高和最低平均压力分别为 239.3kPa 和 200.4kPa,下降了 2.5% 和 9.1%。

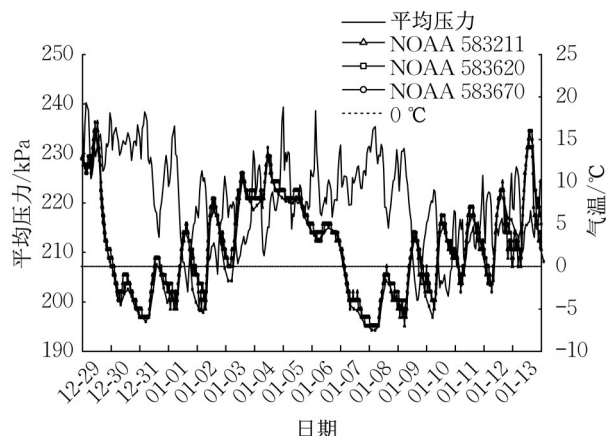


图 2 2 次寒潮气温与平均压力的变化过程

Fig. 2 Temperature and average pressure change process of two cold waves

根据图 2,在 12 月 30 日以前,尽管气温已降至 -5°C ,但监测点压力在快速降温过程中并没有出现显著的异常波动。低温持续一段时间后,压力出现明显下降,波动幅度变大,这表明寒潮对管网系统运行压力的影响有滞后性。这一现象的主要原因在于供水管道埋地下,外界气温的波动需要通过环境传导过程才能影响至管道,这一过程受埋深、土壤环境、降雨量等诸多因素影响。通常埋深越深、环境导热性能越差、降雨量越低,寒潮影响的滞后性越显著。

图 3 给出了管顶温度和平均压力的变化过程。可见,在 2 次寒潮期间,管顶温度降低过程与供水压力降低过程是一致的,这表明供水压力的变化与管周温度的变化密切相关。由于管周温度受外界气温和环境传导过程的影响,进一步造成了寒潮影响的滞后性。

1.3.2 对供水流量的影响

图 4 显示了寒潮期间的日供水量变化。第 1 次寒潮的单日最大供水量为 $908.5 \times 10^4 \text{m}^3$,比前 28d 的正常水平增加了 8.9%;第 2 次寒潮期间单日最大流量为 $957.6 \times 10^4 \text{m}^3$,与正常水平相比增加了 14.8%。

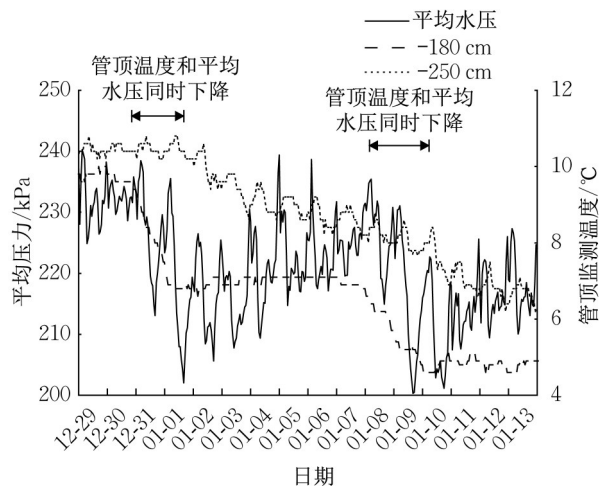


图 3 2 次寒潮管顶土壤监测温度与平均压力的变化过程

Fig. 3 Soil temperature at pipe top and average pressure change process of two cold waves

此外,流量从 12 月 31 日和 1 月 9 日开始出现显著增加,这与压力的异常波动和监测到的管顶温度开始下降时间相吻合,进一步说明了低温穿透周边环境影响到埋地管道是导致供水系统不稳定的重要因素。

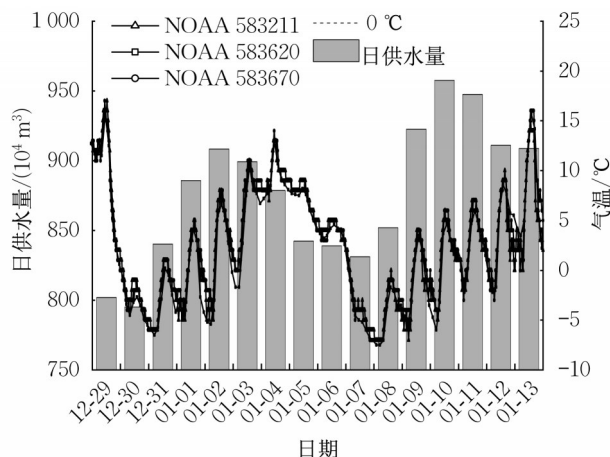


图 4 2 次寒潮期间温度与日供水量变化

Fig. 4 Change of temperature and daily water supply during two cold waves

此外,受供水高峰影响,正常情况下的供水小时流量在一天内多为双峰分布。但从 12 月 31 日和 1 月 9 日开始的 2d 内,小时流量基本为单峰分布,见图 5。主要原因是此时的外界最低气温已穿透土壤并开始影响供水管道,管道温差变形增大,漏损量增加,且漏失的水量基本填平了小时流量的谷值,使曲线呈现出单峰分布。

从供水压力和流量的变化可以看出,寒潮已经严重影响了供水系统的稳定性,在造成供水压力下降的同时,也造成了供水量的大幅上升。正常情况

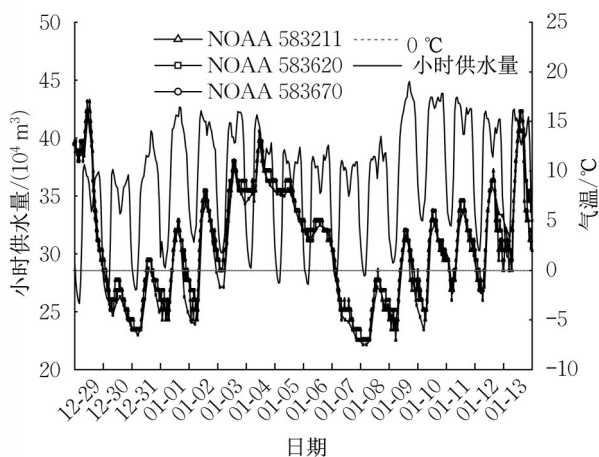


图5 2次寒潮期间温度与小时供水量变化

Fig. 5 Change of temperature and hourly water supply during two cold waves

下上海市单日最高供水量为最大供水能力的65%左右,受寒潮影响,这一比例已上升至76.6%。因此,如果供水量持续上升,不仅会造成大量的水体漏失,甚至可能导致供水系统瘫痪。

1.3.3 对供水管道维修的影响

根据历史统计数据,在第1次寒潮之前的28d里,上海DN500以上管道的日平均故障数为1.7。在这2次寒潮中管道维修的数量明显增加,包括各种泄漏和爆管,如图6所示。在2次寒潮期间,日均管损量分别为3.0次和4.3次,是正常水平的1.8和2.5倍。值得注意的是,2次寒潮期间的单日管损数量最多的日期均处于温度上升初期。从土壤温度监测来看,这一阶段亦是管顶温度下降阶段。换言之,寒潮的低温侵入土壤造成管周温度降低是导致管损的直接因素,由于土壤温度传导过程的影响,管损数量的增加与外界气温的变化过程亦存在滞后效应。

图7和图8分别给出了寒潮期间不同管材和管龄的管损率统计结果。根据图7,管损率最高的为铸铁管,主要原因在于铸铁属于脆性材料,强度低、延展性差,材料对温度附加应力的抵抗能力差。其次是钢管,尽管钢管本身强度较高,但由于采用刚性连接(如焊接和法兰),与承插接口相比,这类接口的允许极限位移较低,对于温差变形的抵抗能力较差。根据图8,事故率随着管龄的增长呈现上升趋势,说明管道的服役年限越久,管道的材料性能退化越明显,抵挡寒潮的能力越差。

1.3.4 对其他供水设施的影响

图9统计了极端寒潮对上海市供水系统中的二次供水设备和水表的破坏情况以及期间每天所接到的热线数量。同样地,寒潮对二次供水设备和水表

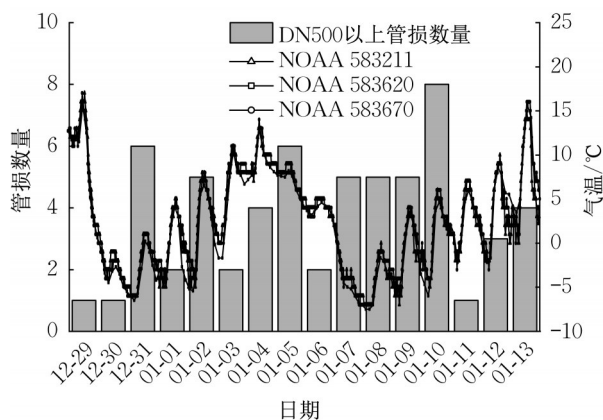


图6 2次寒潮气温与管损事件的变化过程

Fig. 6 Temperature and pipe damage events change process of two cold waves

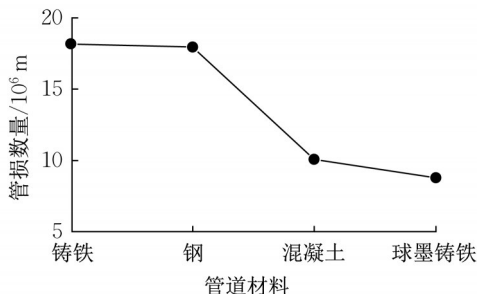


图7 不同管材的失效率

Fig. 7 Failure rates of different pipe materials

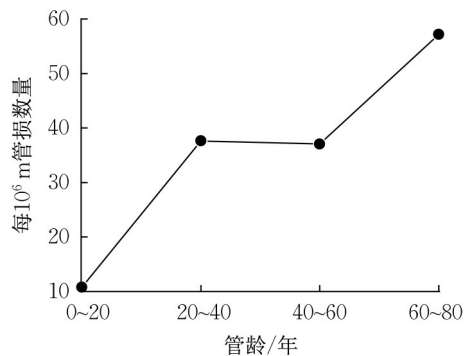


图8 不同管龄的失效率

Fig. 8 Failure rates of different pipe ages

的破坏明显滞后于降温过程,都是在极低温过后温度升高时爆发。这可能是由于温度持续低于冰点温度造成外露设备结冰并产生损坏,在温度上升阶段结冰融化后设备开始漏水,进一步导致维修热线数量的增加。

2 寒潮分类及其物理过程特征

2.1 气象寒潮定义

参考我国规范《寒潮等级》(GB/T 21987—

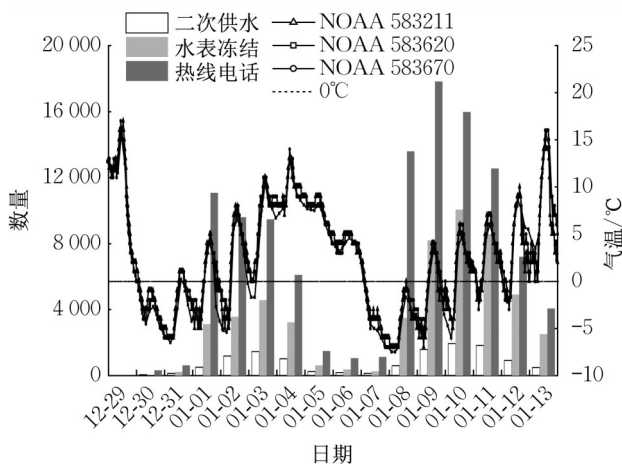


图 9 两次寒潮对供水系统的影响

Fig. 9 Impact of two cold waves on water supply system

2017)^[18]中给出了寒潮定义:使某地日最低气温 24h 内降温幅度不小于 8℃,或 48h 内降温幅度不小于 10℃,或 72h 内降温幅度不小于 12℃,而且使该地日最低气温不大于 4℃的冷空气活动。为进一步了解上海市寒潮特征,这里调研了上海气象部门,收集了上海市自 1960 年以来不同气象站的数据,并对寒潮特征进行分析。

2.2 气象寒潮特征

收集到上海市自 1960 年以来 11 个气象站的寒潮过程记录,其中浦东站的时间跨度为 1997—2020 年,其他站的时间跨度均为 1960—2020 年。各区站的寒潮记录次数有所不同,见表 1。

表 1 上海市气象站寒潮统计信息

Tab. 1 Cold wave statistical information of Shanghai Meteorological Station

站名	区站号	时间跨度	寒潮次数
闵行	58361	1960—2020	158
宝山	58362	1960—2020	142
嘉定	58365	1960—2020	162
崇明	58366	1960—2020	168
徐家汇	58367	1960—2020	147
南汇	58369	1960—2020	148
浦东	58370	1997—2020	43
金山	58460	1960—2020	163
青浦	58461	1960—2020	122
松江	58462	1960—2020	164
奉贤	58463	1960—2020	191

统计数据显示,不同年份的寒潮记录频次差异较大。其中,1966 年出现的频次最多,全上海市单站寒潮过程累计 120 站次,而 1964 年寒潮过程最少,单站寒潮过程累计为零站次。图 10 给出了 1996—2020 年所有监测站记录的寒潮频次统计结果。可

见,近 20 年寒潮过程频次呈加剧趋势。

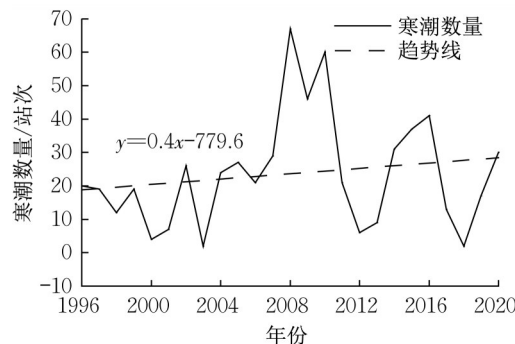


图 10 近 20 年寒潮频次统计

Fig. 10 Frequency statistics of cold wave in the past 30 years

表 2 给出了每站不同级别寒潮的发生频次统计结果。若取所有站的均值分析,上海市最低气温不大于-3℃的寒潮年均发生次数为 0.40 次,最低气温不大于-5℃的寒潮年均发生次数为 0.21 次,最低气温不大于-7℃的寒潮年均发生次数为 0.08 次。

表 2 气象寒潮频次统计

Tab. 2 Statistics of recurrence period

站名	最低温度/℃	年均发生次数	站名	最低温度/℃	年均发生次数
宝山	(-3, 0]	0.61	闵行	(-3, 0]	0.87
	(-5, -3]	0.34		(-5, -3]	0.34
	(-7, -5]	0.20		(-7, -5]	0.21
	≤-7	0.10		≤-7	0.07
崇明	(-3, 0]	0.75	南汇	(-3, 0]	0.69
	(-5, -3]	0.52		(-5, -3]	0.26
	(-7, -5]	0.31		(-7, -5]	0.21
	≤-7	0.11		≤-7	0.08
奉贤	(-3, 0]	0.98	青浦	(-3, 0]	0.66
	(-5, -3]	0.57		(-5, -3]	0.31
	(-7, -5]	0.28		(-7, -5]	0.13
	≤-7	0.10		≤-7	0.05
嘉定	(-3, 0]	0.74	松江	(-3, 0]	0.77
	(-5, -3]	0.34		(-5, -3]	0.43
	(-7, -5]	0.26		(-7, -5]	0.18
	≤-7	0.08		≤-7	0.07
金山	(-3, 0]	0.87	徐家汇	(-3, 0]	0.70
	(-5, -3]	0.49		(-5, -3]	0.36
	(-7, -5]	0.11		(-7, -5]	0.23
	≤-7	0.05		≤-7	0.08

采用当日最低温度、24h 降温、48h 降温、72h 降温、过程最低温度、持续时间共计 6 个因素对气象寒潮事件进行描述。以宝山站数据为例,对每次寒潮事件分别统计 6 种因素,并给出频率分布,见图 11。

根据频率统计图可以得到如下规律:

(1)对于三日内降温幅度而言,24h 或 48h 降温幅度为单峰分布,分别为 9℃和 11℃,72h 降温幅度为

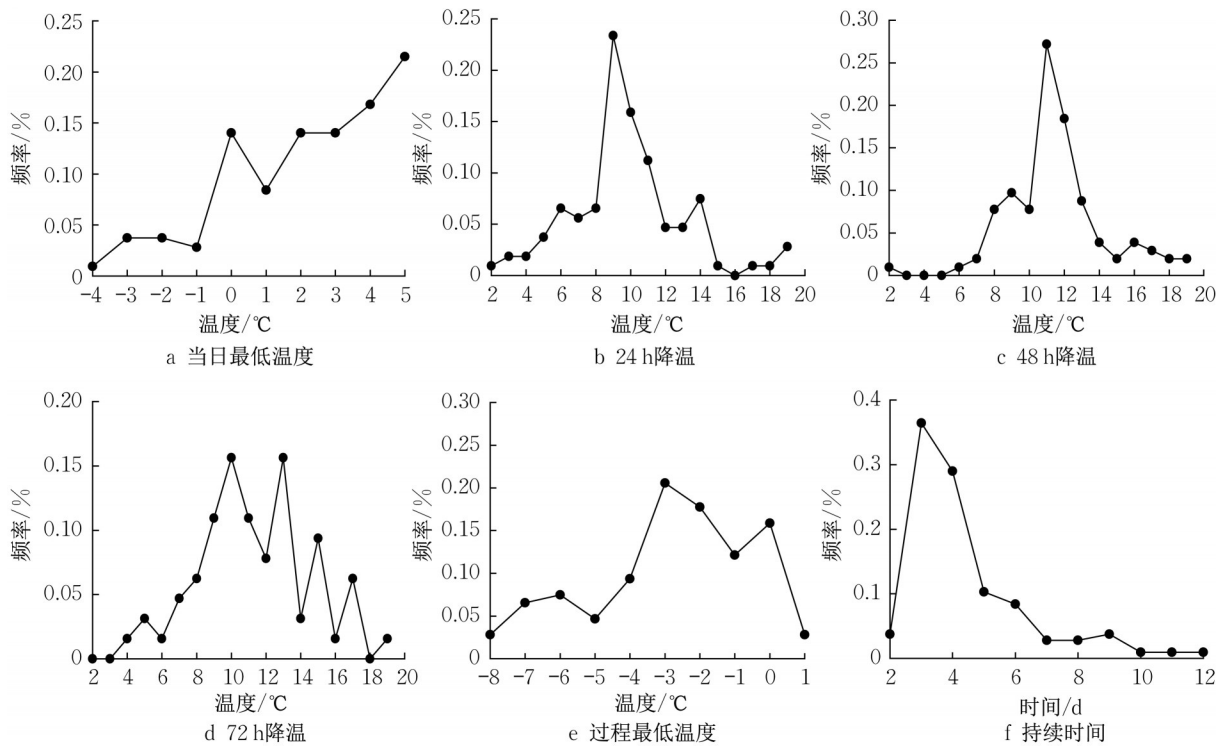


图 11 不同寒潮特征指标的频率分布

Fig. 11 Frequency statistics of cold wave in the past 30 years

双峰分布,分别为10°C和13°C。部分寒潮日降温幅度可达19°C以上。

(2)对于过程最低温度,-3°C的出现概率较大,占比20%,部分寒潮最低温度可达-7°C以下。过程最低温度是对管网运行安全产生重要影响的指标。

(3)对于持续时间,大部分寒潮持续时间在3d左右,5d以上的概率低于10%。

3 寒潮极端温度设防标准分析

城市供水系统中管网、水表等多种设施敷设在环境中,大部分设施因浅埋或暴露在外而受到气温的影响,因此在3.1节中采用低温重现期来考虑设防标准。针对供水管网中的埋地管道,考虑管道敷设环境及地下水影响,由于土体温度传导过程的存在,外界气温的影响存在滞后效应,因此3.2节中通过管道维修数量来进行修正。

3.1 最低温度重现期

通过对每年的最低温度记录进行分析,可以获得低温过程的基本分布规律,为水表等外露设施的设防提供依据。需要指出的是,这里的最低温度指每年气象温度的最低值,不特指寒潮事件。

最低温度重现期的分析步骤如下:

(1)将统计周期 P 年内有 K 次最低气温不大于 t °C的事件记为事件A,由于事件A的发生是独立的,因此可以用泊松(Poisson)分布进行分析。此时,发生 k 次的概率为

$$P(K=k) = \frac{v_t^k}{k!} e^{-v_t} \quad (1)$$

$$v_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{n_{i,t}}{P_i} \quad (2)$$

式中: v_t 为最低温度不大于 t °C的平均发生率; N 为该地区温度监测站点的总数; P_i 为第 i 个温度监测站点的统计周期; $n_{i,t}$ 为第 i 个温度监测站点最低温度不大于 t 的次数。当同一年份内最低温度不大于 t °C的事件发生次数大于1次时,事件计数规则如下:若相邻2次事件发生时间较为接近,且可判断为同一次冷空气导致的,此时可计为一次事件;否则分别统计。

(2)根据式(2)获得平均发生率后,即可计算得到事件的重现期,如式(3):

$$T_{0,t} = \frac{1}{v_t} \quad (3)$$

式中: $T_{0,t}$ 为最低温度不大于 t °C的重现期。

(3)由于事件发生概率的稳定性,事件A的超越概率可以根据式(4)计算:

$$f_{M,t} = 1 - e^{-v_t M} \quad (4)$$

式中: $f_{M,t}$ 为 M 年内最低温度不大于 t °C 的超越概率。

根据上述方法对上海市年最低温度进行统计, 对于每个温度监测站点, 首先计算统计周期内每个年份最低温度的发生频次, 然后根据式(2)计算平均发生率。考虑到水表法定更换周期, 这里以 6 年为周期计算最低温度的超越概率值, 见表 3。

表 3 上海市等效温度作用特征点计算

Tab. 3 Calculation of equivalent temperature action characteristic in Shanghai

最低温度/°C	平均发生率/%	重现期/年	6 年超越概率/%
≤ -10	0.40	252.00	2.4
≤ -9	0.79	126.00	4.7
≤ -8	1.59	63.00	9.1
≤ -7	14.22	7.03	57.4
≤ -6	28.04	3.57	81.4
≤ -5	46.46	2.15	93.8
≤ -4	66.02	1.51	98.1
≤ -3	82.41	1.21	99.3
≤ -2	94.22	1.06	99.6
≤ -1	100.00	1.00	99.8

根据表 3 绘制上海市最低温度概率密度曲线, 如图 12 所示。

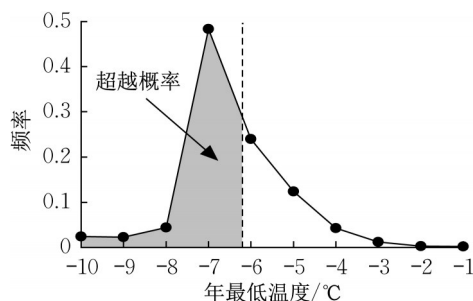


图 12 等效温度概率密度曲线

Fig. 12 Density of equivalent temperature probability

根据图 12, 这里对上海市最低温度作用的设防标准进行初步定义, 规则如下:

(1) 罕遇低温: 所在地域遭遇 6 年超越概率为 2.4% 对应的最低气温值, 上海地区取值为 -10 °C, 重现期 252 年。

(2) 设防低温: 所在地域遭遇 6 年超越概率为 57.4% 对应的最低气温值, 上海地区取值为 -7 °C, 重现期 7 年。

(3) 多遇低温: 所在地域遭遇 6 年超越概率为 93.8% 对应的最低气温值, 上海地区取值为 -5 °C, 重现期 2 年。

3.2 埋地管道寒潮设防标准

工程经验表明, 并不是所有的低温过程或气象

寒潮均会对管道运行造成影响。主要原因有两点:

①如果寒潮期间的最低温度较低, 管周温差变形没有超出管道的极限值, 管道将不受影响; ②受土体温度传导过程的影响, 如果寒潮持续时间较短, 低温将无法传至管周附近, 管道运行亦不受影响。如图 13, 黄浦供水管理所 2017 年初寒潮(最低温度 -2 °C)前后维修量的统计表明, 寒潮期间维修量变化并不明显, 整个寒潮期间也没有发生集中性维修, 表明本次寒潮对埋地管道运行的影响可以忽略。

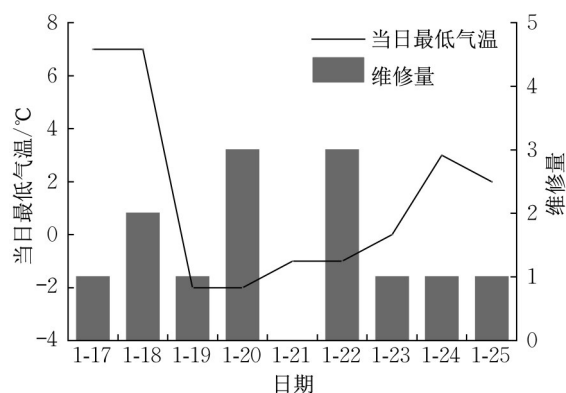


图 13 黄浦供水管理所 2017 年初寒潮前后维修量分析

Fig. 13 Analysis of maintenance volume before and after the cold wave in early 2017 at Huangpu Water Supply Management Institute

换言之, 只有当寒潮期间的最低气温下降到一定程度且维持一定的时间后, 才会影响埋地管道的运行。其中, 最低温度的影响尤为重要。本文通过气温数据和管道维修数据进行关联性分析, 从维修率的角度识别对管道运行造成不利影响的寒潮基准。

为此, 对寒潮前后的维修量进行对比分析。考虑到维修过程的不确定性, 日维修量变化可能波动较大, 因此, 这里采用维修率的概念, 即连续若干天的平均维修量。在此基础上, 通过影响因子来分析寒潮对维修率的影响, 具体定义如下:

$$\eta = \frac{M_P/T_P}{M_A/T_A} \quad (5)$$

式中: η 为影响因子; M_P 为寒潮发生前 T_P 天内的维修总量; M_A 为寒潮发生后 T_A 天内的维修总量。 T_P 和 T_A 一般取最低温度到达前 3~4d。

图 14 给出了寒潮过程最低温度与影响因子的对应关系。由分析可知, 当寒潮过程最低温度高于 -4 °C 时, 大部分影响因子在 1 附近; 当寒潮过程最低温度低于 -6 °C 时, 影响因子均大于 1, 且随着温度的降低, 影响因子有进一步增大的趋势。例如, 当寒潮

过程最低温度为 -8°C 时,部分影响因子可达3以上。由于寒潮次数限制,这里没有捕捉到实际 -5°C 时的情况,但可以推断,对管道运维造成不利影响的过程最低温度基本在 -5°C 左右。

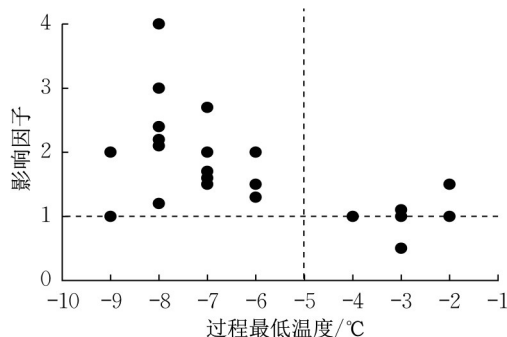


图14 过程最低温度-影响因子统计

Fig. 14 Statistics of process minimum temperature-influence factor

图14还可以直接对维修配件需求量进行预测,从而指导寒潮发生前的物资储备计划。当寒潮过程最低温度小于 -4°C 时,影响因子在1左右,变异系数10%,管网维修量变化不大,配件储备计划参考日常情况上调10%左右。当过程最低温度在 $-5\sim-7^{\circ}\text{C}$ 时,影响因子大于1,均值为1.8,变异系数为15%,配件储备计划应为日常情况的2倍左右。当过程最低温度小于 -7°C 时,影响因子均值为2.2,变异系数为91%,配件储备计划应为日常情况的3倍左右。

4 结语

研究了寒潮对于供水系统的影响规律及设防标准,包括极端寒潮对供水系统压力、流量和管道维修的影响、气象寒潮特征分析以及低温设防标准等。主要结论如下:

(1)极端寒潮会对供水系统造成多方面严重的破坏,包括压力的降低、供水量的增加以及管损事件的集中爆发,受土体温度传导过程的影响,寒潮对于供水系统的影响存在滞后效应。

(2)上海市气象寒潮总体出现增加趋势,近60年来,上海市最低气温 $-3\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的寒潮年均发生次数为0.76次,最低气温 $-5\sim-3^{\circ}\text{C}$ 的年均发生次数为0.40次,最低气温不大于 -7°C 的年均发生次数为0.08次。

(3)对上海市最低温度作用的设防标准进行定义,对应的多遇、设防、罕遇低温的最低温度值分别为 -5°C 、 -7°C 、 -10°C ,6年超越概率为93.8%、

57.4%、2.4%。

(4)实际统计发现,气象寒潮不一定会对埋地管道运行造成影响,现场管网维修资料表明,对管道运维造成不利影响的寒潮最低温度基准在 -5°C 左右。

作者贡献声明:

胡群芳:研究命题提出、研究方案设计、寒潮对上海市供水系统的影响及寒潮设防标准研究。

车德路:寒潮对上海市供水系统的影响分析。

宋朝阳:上海历史寒潮特征以及低温设防标准研究。

王 飞:上海历史寒潮特征以及低温设防标准研究。

方宏远:供水管网极端寒潮灾害分析。

赫 磊:寒潮对上海市供水系统的影响分析。

朱慧峰:寒潮对上海市供水系统的影响分析。

参考文献:

- [1] DIFFENBAUGH N S, SINGH D, MANKIN J S, *et al.* Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(19): 4881. DOI: 10.1073/pnas.1618082114.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. “十四五”全国城市基础设施建设规划 [EB/OL]. [2022-08-10]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zfhcxjsbwj/202207/20220729_767388.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. "The 14th Five-Year Plan" for national urban infrastructure construction [EB/OL]. [2022-08-10]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zfhcxjsbwj/202207/20220729_767388.html.
- [3] SIMPKINS G. The costs of infrastructure adaptation [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 661. DOI: 10.1038/s43017-021-00222-3.
- [4] 李杰. 复杂生命线工程系统的地震反应分析与行为控制[J]. 中国科学基金, 1999(6): 17.
LI Jie. Behavior control and earthquake response analysis of complex lifeline systems [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 1999(6): 17.
- [5] SONG Z Y, LIU W. Failure investigation of water distribution systems in a large city in China based on the pipe failure database [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2022, 13(2). DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000631.
- [6] 金颢. 极寒气候对上海中心城区供水安全保障的影响及应对措施[J]. 水能经济, 2017(6): 227.
JIN Xie. Influence of extreme cold climate on water supply security in Shanghai central urban area and its countermeasures [J]. *Water Energy Economy*, 2017(6): 227.
- [7] 新浪上海. 上海出动9 400人次职工抵御寒潮 修复冻坏水表4万件 [EB/OL]. [2022-08-15]. <http://sh.sina.com.cn/news/>

- m/2021-01-11/detail-iiznctkf1558252-p2.shtml.
Sina Shanghai . Shanghai dispatched 9 400 workers to fight the cold wave and repair 40 000 frozen water meters [EB/OL]. [2022-08-15]. <http://sh.sina.com.cn/news/m/2021-01-11/detail-iiznctkf1558252-p2.shtml>.
- [8] KAKOUDAKIS K, FARMANI R, BUTLER D. Pipeline failure prediction in water distribution networks using weather conditions as explanatory factors [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2018, 20 (5) : 1191. DOI: 10.2166/hydro.2018.152.
- [9] MORRIS R E. Principal causes and remedies of water main breaks[J]. *Journal-American Water Works Association*, 1967, 59(7): 782. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1967.tb03414.x.
- [10] REZAEI H, RYAN B, STOIANOV I. Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 119: 253. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.883.
- [11] HABIBIAN A. Effect of temperature-changes on water-main breaks [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1994, 120 (2): 312. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1994)120:2(312).
- [12] BARTON N A, FAREWELL T S, HALLETT S H, *et al.* Improving pipe failure predictions: Factors affecting pipe failure in drinking water networks [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114926. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114926
- [13] 梁建文,高美娇,赵雅坤,等.市政埋地供水管道抗寒潮可靠度分析[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(2): 10. DOI:10.13577/j.jnd.2019.0202.
LIANG Jianwen, GAO Meijiao, ZHAO Yakun, *et al.* Cold-wave resistance reliability analysis of municipal water supply pipes[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(2): 10. DOI: 10.13577/j.jnd.2019.0202.
- [14] 梁建文,高美娇,巴振宁.寒潮期市政埋地供水管道应力分析[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(2): 436. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.02.012.
LIANG Jianwen, GAO Meijiao, BA Zhenning. Stress analysis of municipal buried water pipes during cold wave period [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 436. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.02.012.
- [15] 谢绍正,卢群展,杨舒灵,等.寒潮期间供水管网事故分析和防治建议[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(6): 1.
XIE Shaozheng, LU Qunzhan, YANG Shuling, *et al.* Analysis and prevention of water supply network accidents in cold wave[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(6): 1.
- [16] 胡群芳,张宁,王飞,等.极端低温下城市供水水表冰冻试验与机理分析[J]. *净水技术*, 2019, 38(5): 115. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2019.05.021.
HU Qunfang, ZHANG Ning, WANG Fei, *et al.* Freezing experiment and mechanism analysis of urban water meter under extremely low temperature[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(5): 115. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2019.05.021.
- [17] National Oceanic and Atmospheric Administration. Meteorological data information [EB/OL]. [2022-09-05]. <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/>.
- [18] 中国气象局.寒潮等级: GB/T 21987—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
China Meteorological Administration. Cold wave levels: GB/T 21987—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.