

大家之言

王圣. 《上海市城镇供水价格管理实施细则》下的高品质供水定价思考[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 1-6, 77.

WANG S. Thoughts on the pricing of high-quality water supply under the *Implementation Rules for the Management of Urban Water Supply Prices in Shanghai* [J]. *Water Purification Technology*, 2025, 44(5): 1-6, 77.

《上海市城镇供水价格管理实施细则》下的高品质供水定价思考

王 圣*

(上海城投<集团>有限公司, 上海 200020)

摘 要 【目的】2023年,在中华人民共和国国家发展和改革委员会、中华人民共和国住房和城乡建设部修订印发的《城镇供水价格管理办法》基础上,上海市发展改革委与水务局发布了《上海市城镇供水价格管理实施细则》,对上海市供水价格的管理进行了详细规范。【方法】为了更好地理解政府政策,促进上海的高品质供水,文章剖析了《上海市城镇供水价格管理实施细则》主要条款,对比上海与国内外部分城市水价,分析上海居民生活供水价格变化及影响并结合高品质供水建设情况开展了供水成本及阶梯水量设置的研究。【结果】结果表明,上海水费占居民收入比例低于国际推荐标准,水价杠杆调节空间大,但当前价格弹性减弱,约束效应趋弱,居民用水量增长与节水目标相悖。同时,上海市市属供水企业目前面临成本压力,若2035年全面普及高品质供水时,每立方米将新增0.438元的建设成本和1.338元的运维成本。此外,阶梯水量设置仍有优化空间,一阶梯水量户数覆盖率2023年达88.27%,价格杠杆作用未充分发挥。【结论】《上海市城镇供水价格管理实施细则》的出台对破解上述问题,促进上海供水企业的可持续发展,城市水资源的节约利用以及供水品质的不断提升都起到了积极的指导和促进作用。

关键词 供水价格 阶梯水量 供水企业 政策解读 高品质供水

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0001-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.001

Thoughts on the Pricing of High-Quality Water Supply under the *Implementation Rules for the Management of Urban Water Supply Prices in Shanghai*

WANG Sheng*

(Shanghai Chengtou <Group> Co., Ltd., Shanghai 200020, China)

Abstract [Objective] In 2023, based on the *Urban Water Supply Price Management Measures* revised and issued by the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, the Shanghai development and reform commission and the water affairs bureau issue the *Implementation Rules for the Administration of Urban Water Supply Prices in Shanghai*, which have provided detailed regulations on the management of water supply prices in Shanghai. [Methods] In order to better understand the government policies and promote high-quality water supply in Shanghai, this paper analyzes the main provisions of the *Implementation Rules for the Administration of Urban Water Supply Prices in Shanghai*, compares the water prices of Shanghai with those of some cities at home and abroad, and analyzes the changes and impacts of the residential water supply prices in Shanghai, and conducts research on water supply costs and tiered water volume settings in combination with the construction of high-quality water supply. [Results] The results show that the proportion of water fees in residents' income in Shanghai is lower than the international recommended standard, and there is a large space for

[收稿日期] 2025-02-12

[通信作者] 王圣(1983—),男,高级经济师,硕士研究生,研究方向为供水安全保障及智慧化建设, E-mail: ctjtwangsheng@chengtou.com。

adjustment by the water price lever. However, the current price elasticity has weakened, the restrictive effect has become weaker, and the growth of residents' water consumption is contrary to the water conservation target. At the same time, the water supply enterprises under Shanghai municipality are currently facing cost pressures. If high-quality water supply is fully popularized in 2035, a construction cost of 0.438 yuan and an operation and maintenance cost of 1.338 yuan will be added per cubic meter. In addition, there is still room for optimization in setting of tiered water volumes. The coverage rate of households within the first-tier water volume reached 88.27% in 2023, and the role of the price lever has not been fully exerted. [Conclusion] The introduction of the *Implementation Rules for the Administration of Urban Water Supply Prices in Shanghai* has played a positive guiding and promoting role in solving the above problems, promoting the sustainable development of water supply enterprises in Shanghai, the conservation and utilization use of urban water resources, and the continuous improvement of water supply quality.

Keywords water supply price tiered water volume water supply enterprise policy interpretation high-quality water supply

随着社会经济的不断发展,人民对于供水品质的要求也在不断提高。自来水作为一种融合了自然资源和商品属性的综合体,与居民生活息息相关,也与国家的高质量发展紧密相连。从自然资源角度出发,由于水具备公共属性,且长期存在水价机制缺陷并实行政策性低价,导致出现水资源浪费、水环境污染、水生态破坏、水空间萎缩等问题^[1]。从商品角度出发,价格和收入是影响居民水消费量的主要因素,但是有别于其他商品,水价的调整往往存在较长滞后性,并不会随居民收入增长或者供水企业成本增加而立刻得到反馈。因此,供水企业长期处于微利甚至周期性亏损经营状态。中国城镇供水排水协会 2018 年对全国约 600 家供水企业的调查显示,超 40% 的供水企业处于亏损状态。而长期亏损经营会使供水企业难以持续投入资金用于供水设施的建设更新与服务提升,进而不利于城市供水的可持续发展^[2-4]。针对上述问题,近年来我国也在不断深化城市供水价格改革,促进供水行业高质量发展^[5]。

1 水价发展的回顾及《上海市城镇供水价格管理实施细则》(以下简称《细则》)理解

1.1 全国水价定位的发展

我国水价改革通过不断地发展,经历了从无偿供给到有偿商品的转变。自新中国成立以来,我国城市水价发展主要经历了 4 个阶段^[6],主要包括公益无偿供水阶段(1949 年—1964 年)、低水价阶段(1965 年—1984 年)、非全成本核算阶段(1985 年—1997 年)、商品化价格形成阶段(1998 年起至今)。我国水价政策的发展除了考虑市场经济规律及企业运营外,还不断着力提升水资源配置作用。为响应“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水方针,我国多部委联合印发的《“十四五”节水型社会

建设规划》中提到:通过采用完善居民生活用水阶梯水价制度,适度拉大阶梯价格级差;科学制定用水定额,有序推进城镇非居民用水超定额累进加价制度;合理确定分档水量和加价标准等方式实现水价在水资源配置、节约保护方面的作用。

1988 年《中华人民共和国水法》的颁布实施,首次从法律上规定了水资源的产权归国家所有。同年,原国家计委和建设部发布的《城市供水价格管理办法》中规定:城市供水价格由供水成本、费用、税金和利润几部分构成,在制定城市供水价格时应遵循补偿成本、合理收费、节约用水、公平负担的原则。2016 年 7 月,全国人民代表大会常务委员会修订印发了《中华人民共和国水法》,也标志着我国供水价格体系的不断完善优化。2021 年 8 月,我国修订印发了原发布的《城镇供水价格管理办法》和《城镇供水定价成本监审办法》,对价格形成机制和监管要求做了新的规定,这也是自 1998 年发布《城镇供水价格管理办法》以来最为重要的一次制度调整和完善,立足破解城镇供水定价和调价的难题^[5]。2024 年 3 月《节约用水条例》的公布,进一步明确了用水实行计量收费的制度,建立促进节水的水价体系。

1.2 上海市水价体系发展

上海市水价体系发展主要经历以下几个阶段:(1)萌芽期(1883 年—1949 年),由街道水龙头供水经挑夫送水到户的路程计费制,过渡为按房屋结构(幢数、楼层等)包月收费制,最后发展为用户装表计量付费模式;(2)固定供水价格期(1949 年—2013 年),居民供水价格并不按量区分,由 1952 年的 0.12 元/t 逐步上升至 1.63 元/t;(3)实施阶梯水价(2013 年起至今),2013 年 9 月 1 日起,上海市正式

实施市属供水企业服务区域内的居民“阶梯水价”方案。

为加强对供水企业成本费用的监管,提高水价改革的科学性和透明度,近些年,上海市有关部门也陆续出台了《上海市供水成本公开实施意见》《上海市供水企业成本规制管理办法》等地方性文件。2023年上海市发展改革委联合上海市水务局在国家发展改革委、住房和城乡建设部发布的《城镇供水价格管理办法》的基础上,结合上海实际,制定了《细则》。《细则》总共7章37条,其中包括:总则、水价制定和调整、水价分类和计价方式、调价程序和信息公开、水价执行与监督、规范收费行为和附则章节。

1.3 《细则》主要条款的理解

《细则》的颁布进一步规范了城镇供水价格管理,保障供用水双方的合法权益,促进城镇供水事业发展,节约和保护水资源,文章将从以下几个方面探讨对《细则》中主要条款的理解。

(1) 保障供水企业合理健康发展

合理的收益是促进供水企业健康可持续发展的重要因素,《细则》中提出的“制定城镇供水价格应当遵循覆盖成本、合理收益”“居民生活用水第一阶梯水价原则上应当按照补偿成本的水平确定”“价格调整不到位导致供水企业难以达到准许收入的,政府应当予以相应补偿”和“城镇供水价格监管周期原则上为3年,经测算需要调整供水价格的,应及时调整到位,价格调整幅度较大的,可以分步调整到位”等条款都是对供水企业面对经营困局时的托底保障。同时,对于环卫绿化、生态景观、消防等存在一定模糊界定的用水明确了支付渠道,保障了供水企业的合理收入。除此以外,《细则》还对供水价格的核定边界进行了规范,其中核定供水量就要求实际供水量和设计供水量的比值不低于65%,以此约束供水企业盲目扩张建设。

(2) 价格杠杆促进水资源节约

供水企业的准许收入在计算时,除了前面所提及的以外,还与自用水率和管网漏损率有关,体现了政府对于水资源高效利用的重视。《细则》中对于居民生活用水的二、三阶梯水价、非居民用水及特种用水的超定额累进加价进行上浮设定,也体现了政府希望采用价格杠杆来促进节约用水和水资源优化配置的想法。同时《细则》提到,环卫绿化、生态景

观、消防等用水应当优先利用再生水,以此充分发挥水资源的再生循环利用效率。

(3) 督促供水企业提升供水品质

供水企业的首要职责是提供优质的供水服务,在完善供水价格促进企业发展的同时,《细则》也对供水水质、水压提出了相关要求,第二十九条和三十条都是对供水水质及供水水压的基本要求,而第十八条中提及的“实行居民生活用水阶梯水价和非居民用水及特种用水超定额累进加价后增加的收入,应当主要用于管网和户表改造、水质提升”也说明供水企业的主要目标不是扩大利润,而是不断提升供水品质。

2 高品质供水目标下的居民供水价格定价思路

2.1 上海水价与国内外城市情况对比

上海作为我国一线城市,其水价的制定除了需结合企业自身经营情况外,还宜参考国内外主要城市的情况。2021年国际水协会(IWA)发布的 *Total Charges for Cities in 2021 for A Consumption of 100 m³* (由于全球各国水价组成并不完全按照供水和排水价格进行区别,特此统一对比)部分数据如图1所示。可以发现,全球水价前10名的城市分别为莫斯科(俄罗斯)、温哥华(加拿大)、欧登塞(丹麦)、埃斯比约(丹麦)、奥尔堡(丹麦)、奥尔胡斯(丹麦)、华盛顿特区(美国)、奥斯陆(挪威)、卑尔根(挪威)和洛杉矶(美国),这些城市的水价均超过7美元/m³(人民币约为49.83元/m³,按2023年12月16日汇率计算)。同时可以发现,全球水价前10名的城市中,丹麦城市占比最高,有4座城市。前10名中除莫斯科和洛杉矶以外,水价均以固定费用、可变费用(按用水量收费)、饮用水其他费用和增值税、污水处理费及其增值税等为主要构成。而相比于国外自来水定价,我国城市的市政自来水价格一直处于较低的水平,排名最高为重庆,位列IWA调研的全球主要城市中的第160位,上海市水价位列第169位。在我国众多城市中,澳门水价构成最为简单,几乎全由可变费用构成,即按量收费。高雄和台北水价中含有一定比例的固定费用。而内地城市主要由可变费用、饮用水其他费用和污水处理费用等构成,其中,上海没有其他费用,香港与上海水费构成相似。

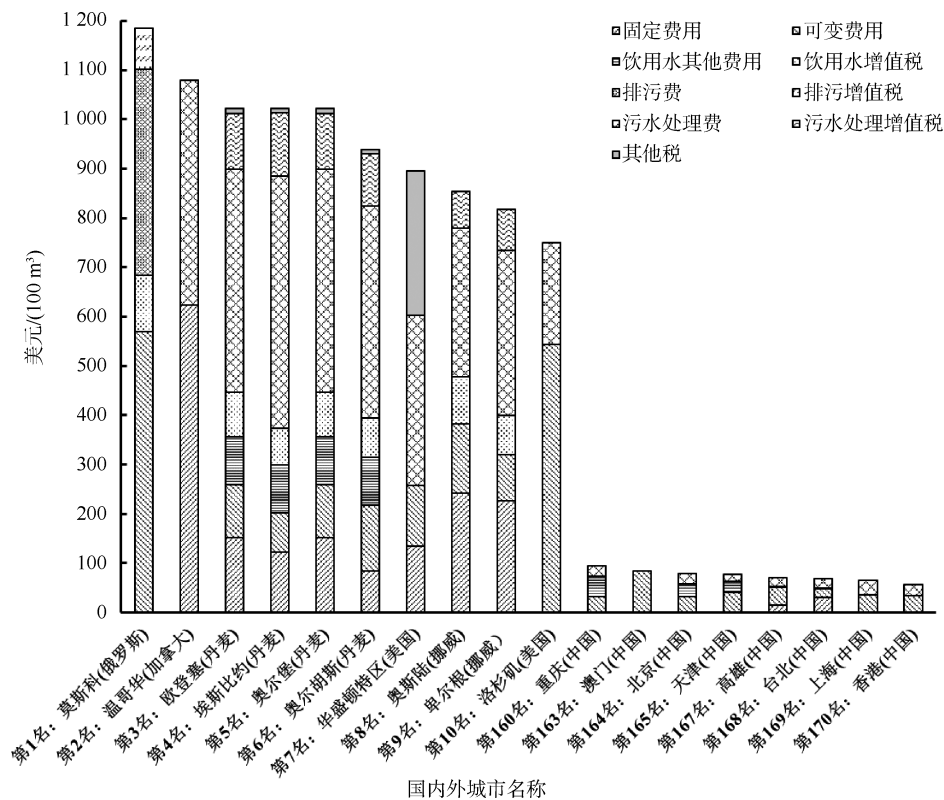


图1 国外主要城市与我国典型城市水费构成对比

Fig. 1 Comparison of Water Price Composition between Major Cities at Abroad and Typical Cities at Home

我国主要城市居民供水价格情况如表1所示,天津、北京、深圳和重庆四市第一阶梯的供水价格分别为3.95、3.64、2.67元/ m^3 和2.50元/ m^3 ,而上海市仅为2.25元/ m^3 ,相对不高。

水价的高低也可以通过水费支出占居民收入的比例进行衡量。事实上,关于水费在家庭年收入中的占比的可接受范围有很多推荐标准,如:联合国开发计划署将3%作为上限;美国国家环境保护局提到了不得超过税前收入的2.5%。我国在《城市缺水问题研究报告》中提到,城市居民生活用水费用支出占家庭收入的适宜比例为2.5%~3.0%^[7]。中华人民共和国水利行业标准《水利建设项目经济评价规范》(SL 72—2013)中指出:当城市居民人均水费支出占可支配收入的比例处于1.5%~3.0%时,属于用水户可接受的范围。

以丹麦为例,将其人均年水费支出在人均年可支配收入中的占比与北京、上海两市的情况相比较,如表2所示。由表2可知,丹麦的人均年生活用水水费支出占可支配收入比例约为上海的3.5倍,北京的2.5倍。同时丹麦人均年可支配收入相较我国也更高,然而人均年居民生活用水量却低于我国主

表1 我国主要城市居民供水价格情况

Tab. 1 Residential Water Supply Prices in Major Cities at Home

城市	阶梯	水量/ m^3	供水价格(含水资源费)/(元· m^{-3})
天津	一	0~180(年用水)	3.95
	二	181~240(年用水)	5.52
	三	>240(年用水)	7.05
北京	一	0~180(年用水)	3.64
	二	181~260(年用水)	5.64
	三	>260(年用水)	7.64
深圳	一	0~22(月用水)	2.67
	二	23~30(月用水)	4.01
	三	>31(月用水)	8.01
重庆	一	0~260(年用水)	2.50
	二	261~360(年用水)	3.22
	三	>360(年用水)	4.90
上海	一	0~220(年用水)	2.25
	二	220~300(年用水)	4.00
	三	300(年用水)	6.99

表 2 2022 年国内外人均年生活用水及可支配收入情况

Tab. 2 Domestic and Overseas Annual Water Consumption and Disposable Income per Capita in 2022

国家/城市	人均年可支配收入/元	人均年居民生活用水量/ m^3	水价/(元· m^{-3})	人均年水费支出占可支配收入比例
丹麦	23.59 万	36.50	55.00	0.851%
北京	7.74 万	52.93	5.00	0.342%
上海	7.96 万	47.82	4.05	0.243%

注:数据源自北京市统计局、上海市人力资源和社会保障局、丹麦国家统计局、《上海水资源公报》和《北京水资源公报》以及计算。

要城市,这可能也正是由于高水价的原因,促使当地居民在使用水资源的过程中更加注重节约^[8]。因此,国内水价的杠杆作用仍有一定调节空间。同时,北京和上海的居民生活用水水费支出占可支配收入比例远低于 1.5%,相对仍处于可接受水平。

2.2 上海居民生活供水价格变化及影响

近 15 年,上海市属供水企业的居民生活供水价格主要经历了 4 次调整,分别是(1)2009 年 6 月 20 日起,从 1.03 元/ m^3 调整到 1.33 元/ m^3 ; (2)2010 年 11 月 20 日起,居民生活用水价格调整为 1.63 元/ m^3 ; (3)2013 年 9 月 1 日起,实施居民生活供水“阶梯水价”(一阶梯为 1.92 元/ m^3 ,二阶梯为 3.30 元/ m^3 ,三阶梯为 4.30 元/ m^3); (4)2021 年 11 月 1 日起,延续居民生活供水“阶梯水价”(一阶梯为 2.25 元/ m^3 ,二阶梯为 4.00 元/ m^3 ,三阶梯为 6.99 元/ m^3)。每次水价调整都会影响居民生活用水量,根据 2007 年—2022 年《上海市水资源公报》的数据,每次居民生活供水价格增高,第二年都会导致居民生活用水量下降(除 2022 年以外),第三年又会反弹上升,具体如图 2 所示。

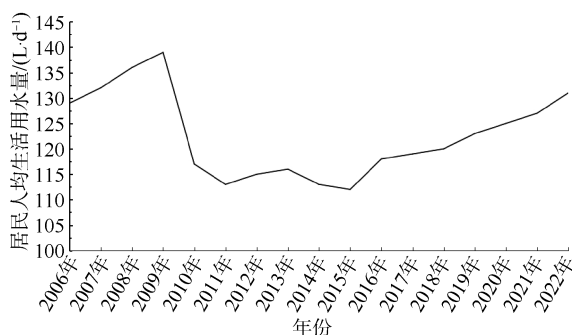


图 2 2006 年—2022 年上海市人均居民生活用水量变化情况

Fig. 2 Changes of Shanghai's Domestic Water Consumption per Capita from 2006 to 2022 in Shanghai

4 次价格增加均约为 0.3 元。由图 2 可知,用水量减少趋势渐缓,或因居民可支配收入增加,价格

弹性减弱。同时,自 2015 年起居民生活用水量持续上升,目前已接近 2009 年的水平。尽管近年来国家大力推进节水工作,节水用具的性能与普及率理论上也应有所提升,但居民用水量不降反升。这一现象从侧面反映出,水价对居民用水行为的约束效应正在逐渐减弱。

为了合理开发利用水资源并满足人民日益增长的用水需求,同时促进节约用水,我国《城市居民生活用水量标准》(GB/T 50331—2002)对上海的居民生活用水标准进行了调整,一、二级用水量上限值从 2002 版的 120、180 L/(人·d)分别降低到 2023 版的 105、160 L/(人·d)。然而,2022 年上海的居民生活用水量已经达到 131 L/(人·d),目前增长趋势未见放缓,这与达成国家水资源合理利用与节水目标不一致。

2.3 高品质供水目标下的定价思路

《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》中明确指出,到 2035 年全市龙头水达到直饮标准。国内其他省市也陆续提出高品质或优质饮用水的建设规划。未来市政饮用水的建设目标,必将从单纯的水量安全保障,向水量水质及服务的协同高品质发展。供水系统涉及环节众多、流程复杂,高品质饮用水建设需要在技术、设施、装备、人员和管理模式等方面投入大量资金。

为了把最好的资源留给人民,用优质的供给服务人民,上海市市属供水企业近年来在水源地建设、原水系统调度、水厂臭氧-生物活性炭深度处理工艺普及、供水管道清洗维护与更新换代、二次供水改造与集中接管以及相关标准规范的制定和数字孪生水厂等智慧水务建设探索等方面开展了大量卓有成效的工作。就上海供水的具体特性来看,若要实现龙头水达到直饮标准,在 2 种常见方式之中,对全流程的设施予以更新并同步开展管理优化,相较于仅仅在二次供水泵房采取终端处理手段,前者在性价比与可操作性方面更具优势。

随着二次供水接管规模日益扩大、老旧市政管网更新改造持续深入以及远传智能水表逐步实现全面覆盖,众多旨在提升供水品质的工程项目纷纷开展,为高品质供水的全面覆盖创造了有利条件。但在此过程中,运营费用也呈现出持续攀升的态势。2023年,上海市市属供水企业的供水单位成本与售水单位收入之间出现了约0.8元的倒挂情况。若以2023年预算成本为测算边界,待2035年高品质供水全面普及之时,经测算将进一步产生0.438元的新增单位建设成本,以及1.338元的新增单位运维成本,当前水价面临较大倒挂缺口。

除了价格方面,在阶梯水量的设置上也存在优化空间,根据《上海统计年鉴(2022)》,以《城市居民生活用水量标准》(GB/T 50331—2002)局部修订条文(2023年版)中上海的二级用水水量上限160 L/(人·d)作为基数,按平均3人/户进行计算,正常1户居民家庭年生活用水量为175 t左右,低于目前的一阶梯220 t的设定值。根据历史数据统计,2020年—2023年,上海市市属供水企业居民一阶梯水量户数覆盖率持续上升,从86.43%提升至88.27%。这一覆盖率高于我国和上海市地方要求,并且超出幅度在不断增大,价格杠杆作用未完全发挥。

随着供水服务边界的不断延伸及服务品质的不断提高,会面临许多个性要求,如:部分高档住宅小区在二次供水设施更新时提出高于普适标准的更高要求,增量部分费用若由水司承担并计入供水成本则对其他用水对象造成不公,应该探索制定“一般标准进价格,特殊要求自负担”机制。同时,接管二次供水设施势必会增加供水企业运营成本,但是接管小区物业费并未同步减少,存在水价和物业费“价费协同”的问题。二供设施主要服务居民用户,从优化营商环境和使用者付费的角度出发,应当单列成本,按用水类型分类进行计价。

3 结论与建议

《细则》的出台对上海供水企业的可持续发展、城市水资源节约利用以及供水品质的不断提升都起到了积极的指导和促进作用。在水价政策的修订和不断完善的过程中,要充分考虑保障供水企业健康以及可持续地发展。同时,约束供水企业盲目扩张,避免资源浪费,最终将不合理成本转嫁给终端用户。

目前,上海居民供水水价及水量设定方面仍存在优化空间,下阶段建议围绕供水企业全生命周期建设运营成本及终端用水实际情况进行合理优化,通过成本绩效管理来严格控制企业经营成本,对于合理成本和收益及时给予价格认定,更好发挥水价的杠杆调节作用,助力2035全市供水直饮目标顺利实现。同时,对于不同供水成本的分摊原则和边界,价费之间的关联协同,主管部门应给予统筹关注,督促助力供水行业用更加公平、优质、价格合理的服务普惠上海市民。

参考文献

- [1] 谷树忠,陈茂山,杨艳,等.深化水权水价制度改革努力消除“公水悲剧”现象[J].水利发展研究,2022,22(4):33-38.
GU S Z, CHEN M S, YANG Y, et al. Deepening water rights and water price reform to eliminate the phenomenon of “tragedy of public water” [J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(4): 33-38.
- [2] 何元春,刘文斌.城市自来水价格机制现状、问题与改革思考[J].城镇供水,2019(5):93-97,108.
HE Y C, LIU W B. Discussion on the present situation, problems and reform of water price mechanism [J]. City and Town Water Supply, 2019(5): 93-97, 108.
- [3] 高伟,章林伟,刘锁祥.浅析城市供水行业存在问题、发展趋势与立法建议[J].给水排水,2020,46(8):1-5,18.
GAO W, ZHANG L W, LIU S X. On the problems, development trends and legislative proposal of city water supply industry [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(8): 1-5, 18.
- [4] 郑新业,李芳华,李夕璐,等.水价提升是有效的政策工具吗?[J].管理世界,2012(4):47-59,69,187.
ZHENG X Y, LI F H, LI X L, et al. Is water price increase an effective policy tool? [J]. Management World, 2012(4): 47-59, 69, 187.
- [5] 李云雁,江小平.我国深化城市供水价格形成机制改革的路径选择—基于激励约束机制及收入校核补偿机制的探索[J].价格理论与实践,2021(8):50-53.
LI Y Y, JIANG X P. Path choice for deepening the reform of water supply price formation mechanism—Exploration based on incentive and restraint mechanism and income check and compensation mechanism [J]. Price: Theory & Practice, 2021(8): 50-53.
- [6] 田贵良.我国水价改革的历程、演变与发展—纪念价格改革40周年[J].价格理论与实践,2018(11):5-10.

(下转第77页)

- trace organic contaminants [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 381: 134879. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134879.
- [6] KALANTARY R R, BARZEGAR G, JORFI S. Monitoring of pesticides in surface water, pesticides removal efficiency in drinking water treatment plant and potential health risk to consumers using Monte Carlo simulation in Behbahan City, Iran [J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131667. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131667.
- [7] 杨晓龙, 刘雯, 胡胜华, 等. 微纳米曝气技术在环保领域的研究进展及应用 [J]. *广东化工*, 2020, 47(13): 134-136, 152. YANG X L, LIU W, HU S H, et al. Research progress and application of micro-nano aeration technology in environment protection [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(13): 134-136, 152.
- [8] 郜银梁, 王澜, 李红桔, 等. 微纳米曝气技术在水环境治理中的应用 [J]. *广州化工*, 2020, 48(12): 93-95. GAO Y L, WANG L, LI H J, et al. Research progress and application of micro-nano aeration technology in environmental protection [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(12): 93-95.
- [9] JOHN A, CARRA I, JEFFERSON B, et al. Enhancement of ozonation using microbubbles-Micropollutant removal, mass transfer and bromate formation [J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 283: 119369. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119369.
- [10] LIU Y, WANG S, SHI L, et al. Enhanced degradation of atrazine by microbubble ozonation [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, 6(6): 1681-1687.
- [11] AHMED A K A, SHALABY M, NEGIM O, et al. Eco-friendly enhancement of secondary effluent characteristics with air and oxygen nanobubbles generated by ceramic membrane filters [J]. *Environmental Processes*, 2023, 10(13). DOI: 10.1007/s40710-023-00628-9.
- [12] WANG B, XIONG X, SHUI Y, et al. A systematic study of enhanced ozone mass transfer for ultrasonic-assisted PTFE hollow fiber membrane aeration process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 357: 678-688. DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.188.
- [13] HAN W R, WANG W L, QIAO T J, et al. Ozone micro-bubble aeration using the ceramic ultrafiltration membrane with superior oxidation performance for 2,4-Delimination [J]. *Water Research*, 2023, 237: 119952. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119952.
- [14] ZHAO M, LIU Y, ZHANG J, et al. Janus ceramic membranes with asymmetric wettability for high-efficient microbubble aeration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 671: 121418. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.121418.
- [15] LI C L, TENG F M, WU F M, et al. Enhanced cavitation dose and reactive oxygen species production in microbubble-mediated sonodynamic therapy for inhibition of *Escherichia coli* and biofilm [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 105: 106853. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.106853.
- [16] VERINDA S B, MUNIROH M, YULIANTO E, et al. Degradation of ciprofloxacin in aqueous solution using ozone microbubbles: Spectroscopic, kinetics, and antibacterial analysis [J]. *Heliyon*, 2022, 8(8): e10137. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10137.
- [17] LI X, LIU C, LIU F, et al. Substantial removal of four pesticide residues in three fruits with ozone microbubbles [J]. *Food Chemistry*, 2024, 441: 138293. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.138293.
- [18] 马艳, 吴俊, 周维. 基于微纳米气泡臭氧曝气的饮用水厂有机物强化处理技术研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(4): 1141-1150. MA Y, WU J, ZHOU W. Research on the enhanced treatment of organic matter in drinking water plant based on micro-nano bubble ozone aeration [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(4): 1141-1150.
- [19] GUO Y, YU G, GUNTEN U V, et al. Evaluation of the role of superoxide radical as chain carrier for the formation of hydroxyl radical during ozonation [J]. *Water Research*, 2023, 242: 120158. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120158.
- [20] ELFIKRIE N, HO Y B, ZAIDON S Z, et al. Occurrence of pesticides in surface water, pesticides removal efficiency in drinking water treatment plant and potential health risk to consumers in Tengri River Basin, Malaysia [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136540.
- [21] GUO Y, ZHAN J H, YU G, et al. Evaluation of the concentration and contribution of superoxide radical for micropollutant abatement during ozonation [J]. *Water Research*, 2021, 194: 116927. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116927.

(上接第6页)

- TIAN G L. The Course, evolution and development of water price reform in China—Commemorating 40 years of price reform [J]. *Price: Theory & Practice*, 2018(11): 5-10.
- [7] 潘桂娥. 基于 AHP 法的水价结构研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008. PAN G E. Research on water price structure based on AHP method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [8] 郭昕, 陈新颖, 杨玉川, 等. 丹麦水环境管理经验与启示 [J]. *世界环境*, 2022(4): 75-79. GUO X, CHEN X Y, YANG Y C, et al. Experience and enlightenment of water environment management in Denmark [J]. *World Environment*, 2022(4): 75-79.