

述评与讨论

中美给水常规工艺对比分析

王全勇^{1,2}, 彭锦玉¹, Kodi Webb³, 付成胜¹, 解跃峰^{2,3}

(1. 中国城市建设研究院有限公司 山东分院, 山东 济南 250101; 2. 清华大学环境学院
环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 3. Environmental Pollution Control
Programs, The Pennsylvania State University, USA)

摘要: 浊度是表征供水水质安全的一个重要指标。中美两国普遍采用常规处理工艺,但在出水浊度上差异很大,在中美同纬度下各挑选了具有代表性的3座地表水厂进行现场调研及对比分析。结果表明,美国水厂出水浊度一般控制在0.1 NTU以下,甚至稳定在0.03~0.05 NTU范围内,而我国水厂出水浊度一般为0.2~0.8 NTU。同时美国沉淀出水浊度通常在0.5 NTU以下,而我国通常为0.8~3.0 NTU。美国滤池通常采用煤砂双层滤料,滤池反冲洗周期为3~4 d。在运行方面,美国水厂实际运行水量通常为设计水量的50%,而我国水厂通常为满负荷运行。这些对比分析结果为将来我国水厂水质提标改造提供了理论和实践基础。

关键词: 浊度; 供水水质; 处理工艺

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)24-0008-06

Comparative Analysis of Conventional Water Treatment Processes between China and the United States

WANG Quan-yong^{1,2}, PENG Jin-yu¹, Kodi Webb³, FU Cheng-sheng¹, XIE Yue-feng^{2,3}

(1. Shandong Branch, China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Jinan 250101, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Environmental Pollution Control Programs, The Pennsylvania State University, USA)

Abstract: Turbidity is an important water quality indicator for drinking water safety. Although China and the United States (US) commonly use conventional treatment processes for water purification, there is a substantial difference in their effluent turbidity. Three surface waterworks in the same latitude place in each country were selected for field investigation and comparative analysis in this study. With conventional treatment processes, effluent turbidity in US waterworks was below 0.1 NTU, constantly being kept in the range of 0.03 to 0.05 NTU. While effluent turbidity in China waterworks was in the range of 0.2 to 0.8 NTU. The effluent turbidity of sedimentation tank was less than 0.5 NTU in US waterworks, and that was in the range from 0.8 to 3.0 NTU in China. The anthracite/sand dual media filter with a backwash frequency of 3 to 4 days was commonly selected in US waterworks. In operation, all

three waterworks in China were running at their full capacities. While, running capacity in US waterworks were less than 50% of their design capacity. Results from this study provide a theoretical and practical basis for the future improvement of water quality in China waterworks.

Key words: turbidity; water supply quality; treatment processes

目前,我国颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)和《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)都要求饮用水的浊度不高于 1 NTU,绝大部分水厂的滤后水浊度可以满足此要求,但很难将这一指标降至 0.1 NTU 以下,部分水厂的出水浊度达到 0.3 NTU 以上。相比而言,美国联邦饮用水标准要求 95% 以上的滤后水样品浊度不大于 0.3 NTU^[1]。在未加设深度处理工艺,仅通过优化常规处理工艺的情况下,美国相当部分水厂的出水浊度可降低至 0.1 NTU 以下,甚至稳定在 0.03 ~ 0.05 NTU 范围内。

浊度对于给水处理来说是一个至关重要的水质指标,降低浊度的同时也降低了水中的细菌、大肠菌、病毒、隐孢子虫等的数量以及铁、锰等离子含量。研究表明,当浊度控制在 0.1 NTU 以下时,贾第鞭

毛虫、隐孢子虫的去除率分别达到 99.9% 以上^[2],越低的浊度水平代表着越小的微生物风险和越高的供水质量。钱孟康^[3]、姚宏等^[4]学者均对美国水厂的运行情况进行了探讨,但这些研究只局限于讨论某些工艺和某一工段,并未通过对全流程参数的分析而掌握其运行策略。因此,挑选中美同纬度下(北纬 36° ~ 42°)具有代表性的 3 座地表水厂进行详细对比分析,以求找出中美水厂设计运行中的相同与不同,以及挖掘美国水厂运行过程中值得借鉴的理念和经验,为将来我国水厂水质提标改造提供理论和实践基础。

1 原水水质对比

美国 3 座水厂均位于宾夕法尼亚州(以下简称宾州)中南部地区,中国 3 座水厂均位于山东省,各水厂水源水的水质比较见表 1。

表 1 中美水厂水源水水质对比

Tab. 1 Comparison of source water quality between Chinese and American waterworks

项目	美国宾州 A 水厂	美国宾州 B 水厂	美国宾州 C 水厂	中国山东 A 水厂	中国山东 B 水厂	中国山东 C 水厂
供水量/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	0.8(1.5)	7.2(14.8)	2.8(7.6)	40(40)	10(10)	2(2)
水源水	河流	河流	水库	水库	水库	水库
原水浊度/NTU	2 ~ 300	4 ~ 16	4 ~ 20	夏:5 ~ 8, 冬:1 ~ 4	夏:13 ~ 30, 冬:4 ~ 8	夏:8 ~ 30 冬:6 ~ 8
TOC/(mg · L ⁻¹)	1.9 ~ 4.0	2.0 ~ 2.7	0.96 ~ 2.6	1.66 ~ 3.80	2.45 ~ 3.37	2.37 ~ 2.74
COD _{Mn} /(mg · L ⁻¹)	—	—	—	1.76 ~ 4.32	2.58 ~ 3.54	2.52 ~ 3.81
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.054 ~ 0.103	0.039 ~ 0.054	—	0.063 ~ 0.153	0.044 ~ 0.055	0.039 ~ 0.097
pH 值	—	—	—	7.81 ~ 8.53	8.19 ~ 8.42	8.20 ~ 8.40
色度/倍	—	—	—	5 ~ 38	10 ~ 20	15 ~ 20
注: 括号内数值为水厂设计供水量。						

美国宾州 A、B 两水厂水源皆取自河流(如萨斯奎哈纳河等),美国 C 水厂取自水库。我国 3 座水厂皆取自水库水。据文献报道,由于美国对水源保护力度大,使得其原水水质条件优于我国^[5,6]。因此,为保证后续工艺的可比性,两国所选水厂原水水质相近。由表 1 可见,我国水厂 TOC 数值总体略高于美国;而美国 A 水厂和我国 A 水厂 UV₂₅₄ 数值较高,其他水厂之间差别不大。在浊度方面,我国水源水有明显冬低夏高季节性变化的特点,例如我国山

东 B 水厂,其冬季原水浊度为 4 ~ 8 NTU,但夏季浊度会升至 30 NTU。因此,综合考虑各水质指标的代表性,确定以浊度作为典型指标进行对比分析。

由实际供水量和设计水量对比可见,国内水厂基本都按照设计水量满负荷运行,美国水厂实际供水量远低于设计水量。基于保证用水量的考虑,美国水厂通常以未来 10 ~ 20 年的最高日需水量来确定设计水量。美国 A、B 水厂分别为新建和新扩建水厂,因此调研时的实际运行水量仅为其设计水量

的 50% 左右。美国 C 水厂建于 20 世纪 90 年代,由于该市人口减少和工业萎缩,调研时的实际运行水量仅为设计水量的 37%。

在水厂工艺方面,所选的美国水厂都以常规处理工艺(即混合/絮凝/沉淀/过滤)为主,未选用任何深度处理工艺;而我国 B、C 两水厂为保证出水水质,则采用了常规工艺与深度处理相结合方式,分别增设了超滤膜处理和臭氧-活性炭工艺。除美国

C 水厂外,其余 5 座水厂皆采用了预氧化处理,其中我国 C 水厂采用臭氧预氧化(臭氧投加量约为 1 mg/L),其他 4 座水厂所投药剂以高锰酸盐为主。由于美国水厂仅采用了常规处理工艺,因此,两国水厂之间的对比仅围绕常规工艺展开。

2 常规工艺运行策略对比

2.1 混合工段对比分析

表 2 为中美水厂混合工段对比分析。

表 2 中美水厂混合工段对比

Tab. 2 Comparison of mixing process between Chinese and American waterworks

项目	美国宾州 A 水厂	美国宾州 B 水厂	美国宾州 C 水厂	中国山东 A 水厂	中国山东 B 水厂	中国山东 C 水厂
混合方式	管式	机械	管式	管式	管式	机械
混凝剂种类	PAC	硫酸铝	硫酸铝	PAC	PAC	PAFC
投加量/(mg·L ⁻¹)	20~50	15~45	10~12	14~16	6~7	15.0~16.2
其他药剂	无	无	无	粉炭(5 mg/L)	粉炭(3 mg/L)	无
停留时间/s	≈1	<30	≈1	60	50	50
注: 药剂投加量按固体质量计算。						

由表 2 可见,美国水厂的混合系统与我国基本相似,都是以机械混合和管式静态混合为主。但混合时间不同:我国水厂混合过程一般需 50~60 s,而美国 3 座水厂使用超高速混合设备,使得混合时间全部小于 30 s。越短的混合时间表明药剂水解的概率越低,越有利于混合过程的进行^[7]。因此,在后续国内水厂改造中,可通过改良设备缩短混合时间,提高混合效果。

在混凝剂投加量方面,为保证 TOC 去除效率,通过增加药剂投加量来强化混凝过程,美国宾州的

A、B 两水厂混凝剂投加量分别高达 50 和 45 mg/L,而我国 3 座水厂 PAC 投加量不超过 17 mg/L。在合理范围内提高混凝剂投加量,会增加颗粒物参与吸附架桥、网捕与卷扫等作用的机会,有利于破坏胶体聚集稳定性,提高混凝效果^[7]。另外,美国水厂一般在原水水质变化时都会进行烧杯实验,以确定最适加药量,避免投加量过大而导致胶体再稳定,此操作理念值得国内水厂学习。

2.2 絮凝工段对比分析

表 3 为中美絮凝工段对比分析。

表 3 中美水厂絮凝工段对比

Tab. 3 Comparison of flocculation process between Chinese and American waterworks

项 目	美国宾州 A 水厂	美国宾州 B 水厂	美国宾州 C 水厂	中国山东 A 水厂	中国山东 B 水厂	中国山东 C 水厂
絮凝方式	机械絮凝	机械絮凝	机械絮凝	折板絮凝	折板絮凝	机械絮凝
水力停留时间/min	50(25)	20~30	80(28)	16	15	20
絮状物形态	小,絮状物密实良好	细小颗粒	细小颗粒	大,片状絮体	观察频率低	稍大,片状
出水 30 min 沉淀后浊度/NTU	<1,大部分时间小于 0.4	<1	<1	无此项检测项目	无此项检测项目	无此项检测项目
注: 括号内数值为设计水力停留时间。						

由表 3 可见,调研的美国 3 座水厂皆使用机械絮凝工艺,而我国山东 A、B 水厂均采用折板絮凝工艺。折板和网格絮凝方式难以调节水力条件,很难通过改变药剂投加来达到最优的控制参数。而机械絮凝可以根据水质和药剂投加量控制每级的功率和搅拌速度,以适应季节和水质的变化^[8]。在絮凝时

间上,我国山东的 3 座水厂受设计规范制约,水力停留时间一般都控制在 15~20 min。而美国宾州《公共供水手册》建议絮凝时间为 20~30 min,美国《饮用水水厂十州建议标准》建议絮凝时间至少 30 min。

美国 C 水厂因实际运行水量远低于设计水量,

其絮凝工段停留时间高达 80 min。美国 A 水厂其设计水量为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,但为了方便将来提高设计产量,修建了 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 毛坏滤池,在沉淀池预留了 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 斜板空间,同时将絮凝池直接按 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 设计修建,导致絮凝工段停留时间高于设计值。同时美国水厂一般会考虑在其中某个运行单元检修停水时,其他单元也要满足设计要求,故会实际多修建一个单元。这也是美国水厂絮凝时间和

其他设计参数比较保守的原因之一。

另外,美国水厂在日常检测中,会根据混凝段(包括混合和絮凝)出水浊度评价此工段运行效果,并根据数值和絮体性状调整工段运行。调研中发现,国内水厂往往只检测进水、沉淀池和滤池出水浊度,而忽略了对混凝段出水絮体的检测和评价。

2.3 沉淀工段对比分析

表 4 为中美水厂沉淀工段对比分析。

表 4 中美水厂沉淀工段对比

Tab. 4 Comparison of sedimentation process between Chinese and American waterworks

项 目	美国宾州 A 水厂	美国宾州 B 水厂	美国宾州 C 水厂	中国山东 A 水厂	中国山东 B 水厂	中国山东 C 水厂
沉淀形式	斜板沉淀	斜板沉淀	斜管沉淀	平流沉淀池	平流沉淀池	斜管沉淀
水力负荷/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	5(15)	5(15)	1.8(7.5)	0.67	1.37	4.1
排泥周期/h	8	—	8	24	12	6~12
沉淀出水浊度/NTU	<0.5	75% 的时间 <0.5	0.2	1.4~1.8	1.0~3.0	0.8~2.0
注: 括号内数值为设计水力负荷。						

由表 4 可见,美国 3 座水厂所用沉淀方式为斜板沉淀或斜管沉淀,这两种沉淀方式在美国普遍采用,而平流沉淀使用很少。国内水厂仍普遍使用平流沉淀池,仅在寒冷地区多采用斜管沉淀。与平流沉淀相比,斜板沉淀和斜管沉淀可以有效提高单位池面积的产水量并降低出水浊度。对于沉淀池排泥周期,中美两国并无太大差别。根据运行情况不同,我国水厂的排泥周期通常有 6、12、24 h 等。不同的是,我国排泥多采用刮泥机、吸泥机等设备,但美国

水厂排(刮)泥设备先进,如使用自动化池底污泥清扫器,对节水和污泥处理大有好处。

另外,值得注意的是,由于良好的混凝及沉淀效果,美国 3 座水厂沉淀池出水浊度已降至 0.5 NTU 以下,美国 C 水厂甚至降至 0.2 NTU。而我国的 3 座水厂同工段出水浊度仍在 0.8~3.0 NTU 之间,由此可见两国的浊度差距在沉淀段出水已然明显。

2.4 过滤工段对比分析

表 5 为中美过滤工段对比结果。

表 5 中美水厂过滤工段对比

Tab. 5 Comparison of filtration process between Chinese and American waterworks

项 目	美国宾州 A 水厂	美国宾州 B 水厂	美国宾州 C 水厂	中国山东 A 水厂	中国山东 B 水厂	中国山东 C 水厂
滤料	无烟煤/ 砂双层滤料	无烟煤/ 砂双层滤料	无烟煤/ 砂双层滤料	活性炭/ 砂双层滤料	石英砂单一滤料	石英砂单一滤料
滤速/ $(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	3.7(10)	4.4(10)	3.4(10)	7~8	8	7~8
过滤周期/h	72	72	96	24~36	12~16	24
滤后水浊度/NTU	0.03~0.05	0.04	0.03	0.20~0.28	0.30~0.80	0.20~0.40
TOC/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.20~2.40	1.30~2.00	0.83~2.10	1.54~2.23	1.42~2.15	1.86~2.30
COD _{Mn} / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	—	—	1.72~2.37	1.65~2.35	2.01~2.39
UV ₂₅₄ / cm^{-1}	0.022~0.032	0.019~0.026	—	0.032~0.038	0.032~0.035	0.022~0.030
pH 值	—	—	—	7.90~8.15	7.71~7.80	7.69~7.89
THMs/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	5.0~62.3	13.0~52.0	13.7~79.3	<5	<5	<5
色度/倍	—	—	—	<5	<5	<5
注: 括号内数值为设计滤速。						

由表 5 可见,在滤料选择上,国内 B、C 水厂滤池均采用单层石英砂滤料,美国则以双层滤料为主,

即上层为无烟煤,下层为细砂,且无烟煤厚度大于砂层。双层滤料符合理想过滤的模型,避免了单一滤

料反洗水力分级后上层细砂堵塞速度快、不能发挥深层过滤作用的缺点,使滤料在过滤周期内的有效功能得以发挥,减少了水头损失,延长了过滤周期^[9]。

在滤池池型上,我国绝大多数给水厂普遍采用了以V型滤池为主的均质滤料过滤技术,极少采用不同或新型的过滤技术,这一点与国内室外给水设计规范影响有关,同时也与我国大部分设计院较少对过滤技术进行研究开发,倾向引进国外专有技术的导向有关。而美国滤池设计上池型很少采用V型滤池,多为简单实用的普通快滤池结构,且每座滤池均设置在线浊度仪。

一方面,美国水厂滤池进水,即沉淀池出水浊度已经低于0.5 NTU,且采用双层滤料,提高了滤料利用效率;另一方面,由表5可见,因美国3座水厂实际运行水量远低于设计水量,实际滤速均不高于4.4 m/h,比设计值或国内滤速低45%~50%。此外,为防止藻类滋生和去除部分有机物,美国3座水厂均采用中间加氯(过滤前)方式,加氯量为0.4~2.0 mg/L,有效延长了过滤周期^[10]。基于以上原因,美国3座水厂滤池过滤周期可达72~96 h,而我国3座水厂过滤周期仅为12~36 h。较长的过滤周期带来较低的反冲洗耗水量、耗电量、滤料损失,大大降低了运行成本。

由表1和表5的对比可见,美国A水厂的TOC与UV₂₅₄去除效果都较为明显,对比与A水厂同地区的C水厂运行参数可知,通过提高药剂投加量强化混凝过程,可获得较高的有机物去除效率^[7]。由表5可见,经常规工艺处理后,美国宾州3座水厂TOC与UV₂₅₄均略低于中国,且差距并不明显。但在浊度方面,美国3座水厂浊度皆降至0.05 NTU及以下,而我国水厂浊度仍不低于0.2 NTU。分析原因一是美国水厂原水TOC等本身就比较低,二是美国水厂较高的处理效率,可以将浊度等指标降至更低水平。调研中也发现我国南方部分水厂为降低浊度,在过滤前采用加药微絮凝或加其他助滤剂工艺,但过滤周期严重降低,存在未反应的药剂穿透滤层后影响水质的问题。

3 结语

综上所述,中美水厂常规工艺路线相同,进水浊度指标类似,但出水浊度存在较大差距,所调研的美国3座水厂出水浊度可控制在0.03~0.05 NTU,而

国内的3座水厂出水浊度均在0.2 NTU以上,其运行策略差别如下:

① 美国水厂更加注重混凝工艺的设计研究和运行控制。例如,使用超高速搅拌机以缩短混合时间,适当提高混凝剂投加量以增加颗粒物参与吸附、架桥与卷扫的机会,控制絮凝水力条件以适应水质水量的变动,持续监测混凝段效果以优化工艺运行效果。由于良好的混凝效果,使得絮体更易沉降,因此美国水厂沉淀池出水浊度可降至0.5 NTU以下,大大降低了后续处理负荷。

② 美国水厂沉淀池多采用斜板和斜管沉淀,提高了单位池面积的产水量,降低了出水浊度。滤池多采用普通快滤池,舍去了V型滤池中间配水渠道,节约了滤池造价,滤料多使用煤砂双层滤料,实际滤速均不高于4.4 m/h,过滤周期可达3~4 d。

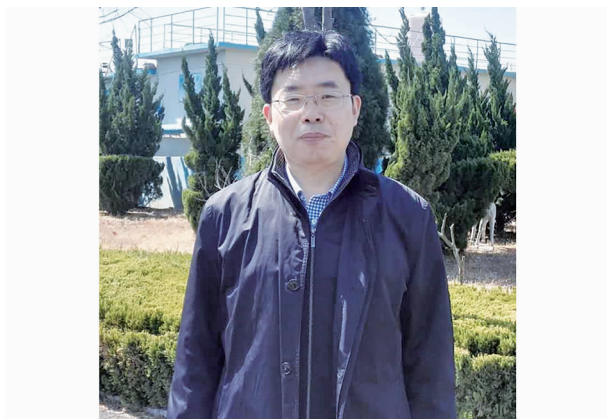
③ 经常规工艺处理后,由于美国水厂较高的处理效率,使得其出水浊度、TOC与UV₂₅₄等指标优于我国。尤其在浊度方面,美国3座水厂出水浊度皆降至0.05 NTU及以下,而我国水厂出水浊度仍不低于0.2 NTU。

因此,常规处理工艺效率偏低,管理水平与美国存在差距,是我国水厂普遍存在的问题。积极吸取国外先进技术成果,加强基础理论研究,对我国现有水厂常规工艺的运行情况进行优化,着力降低出水浊度,是提高国内供水水质的有效途径。

参考文献:

- [1] 解跃峰. 美国饮用水达标概况与启示[J]. 给水排水, 2012, 38(10): 1-3.
Xie Yuefeng. US drinking water compliance summary and suggestions[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(10): 1-3 (in Chinese).
- [2] 张伟, 陈志平. 自来水厂工艺优化与水质管理[J]. 净水技术, 2014, 33(S1): 192-195.
Zhang Wei, Chen Zhiping. Optimization of treatment process and water quality management in waterworks[J]. Water Purification Technology, 2014, 33(S1): 192-195 (in Chinese).
- [3] 钱孟康. 欧美城市给水处理技术考察与比较[J]. 给水排水, 2001, 27(4): 10-13.
Qian Mengkang. Investigation on urban water treatment of western countries[J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(4): 10-13 (in Chinese).

- [4] 姚宏,张士超,周小轮,等. 美国某给水厂处理工艺及净水效果[J]. 环境工程学报,2013,7(2):422-426.
Yao Hong, Zhang Shichao, Zhou Xiaolun, *et al.* Process design and water purification efficiency of one water treatment plant in America[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(2): 422-426 (in Chinese).
- [5] Han D, Currell M J, Cao G. Deep challenges for China's war on water pollution[J]. Environ Pollut, 2016, 218: 1222-1233.
- [6] 张姝歆. 中美地表饮用水源法律保护制度和水质评价方法的研究[D]. 北京:首都经济贸易大学,2017.
Zhang Shuxin. Study on the Surface Drinking-water Sources Protection of Legal System and Water Quality Assessment Methods in China and the United States [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2017 (in Chinese).
- [7] Sillanpää M, Ncibi M C, Matilainen A, *et al.* Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review[J]. Chemosphere, 2018, 190: 54-71.
- [8] Cestari J L, Matsumoto T, Gebara D, *et al.* Hydrodynamic evaluation of the influence of outlet configuration for mechanical flocculation facilities[J]. Water Sci Technol Water Supply, 2016, 16(1): 17-25.
- [9] 张奔,张克峰,王小佺. 三种煤砂滤池过滤参数优化及过滤性能研究[J]. 给水排水, 2016, 42(5): 46-51.
- Zhang Ben, Zhang Kefeng, Wang Xiaomao. Filtration parameter optimization and performance research on three kinds of anthracite-sand filters[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(5): 46-51 (in Chinese).
- [10] 聂荣飞,张克峰,王小佺,等. 次氯酸钠强化过滤去除水中颗粒物的试验研究[J]. 给水排水, 2015, 41(6): 18-22.
Nie Rongfei, Zhang Kefeng, Wang Xiaomao, *et al.* Study on enhanced filtration of suspending particles in water by sodium hypochlorite[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(6): 18-22 (in Chinese).



作者简介:王全勇(1969-),男,山东阳谷人,博士在读,教授级高级工程师,研究方向为给水处理理论及应用、水污染控制理论及应用、给水排水工程系统及优化。

E-mail: hkyys@vip.sina.com

收稿日期:2018-05-16

讣告

天津大学环境科学与工程学院林荣忱教授(退休),因病经抢救无效,于2018年12月9日凌晨2时在天津逝世,享年91岁。林荣忱教授是天津大学给排水专业(现环境科学与工程学院)的主要创始人之一,是我国给排水行业的著名专家,曾任建设部给排水专业指导委员会委员并在多个国家和省市级学术组织任职,是《中国给水排水》杂志早期编委会成员之一,承担过多项国家重大科技攻关项目,获省部级科技奖励多项。林荣忱教授著作丰厚,编写出版多本排水工程方面的国家级经典教材和著作。他德高望重、严谨求实、诲人不倦,为国家排水技术发展作出了重要贡献。

沉痛悼念林荣忱教授!

特此讣告

《中国给水排水》杂志社
2018年12月9日