杨翊辰，刘生杰，王忠静，等. 饮用水原水水质与制水工艺级联组合的经济可持续性评价[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(8)：108-121. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.008
YANG Yichen，LIU Shengjie，WANG Zhongjing，et al. Economic sustainability evaluation of cascaded combinations of raw water quality and water treatment processes for drinking water[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(8)：108-121. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.008

饮用水原水水质与制水工艺级联组合的经济可持续性评价

杨翊辰[1]，刘生杰[2]，王忠静[1,3]，刘　丹[1]，张震中[1]，汝　楠[1]，金盼心[3]
(1. 清华大学 土木水利学院，北京　100084；2. 甘肃省水务投资集团有限公司，甘肃 兰州　730050；
3. 宁夏大学 土木与水利学院，宁夏 银川　750026)

摘　要：【目的】在我国脱贫攻坚取得全面胜利、饮水安全得到总体解决的背景下，部分水资源短缺和环境脆弱地区，特别是苦咸水分布区，其安全供水的经济可持续性仍面临挑战。已有的以苦咸水为饮用水源的研究结果，制水成本差异大，不确定性高，主要原因是未从原水水质、制水工艺与饮用水标准三者间关系角度联合研究，成果只反映其中某一过程。【方法】从饮用水制水的完整链路出发，构建“原水水质-制水工艺-饮用水标准”全过程级联组合链路关系及其经济性评价模型。该模型以原水溶解性总固体(Total Dissolved Solids，TDS)为关键特征指标，系统分析不同TDS浓度的原水在不同制水工艺下满足不同饮用水标准时的制水成本，进而与我国主要省会城市及计划单列市现行第一阶梯水价比较，评估其不同级联组合制水的经济可持续性。【结果】在我国现行饮用水标准下，当原水TDS≤1 000 mg/L时，常规处理或超滤工艺即可稳定达标，制水成本低、经济可持续性强；当TDS为1 000~1 500 mg/L时，需配置纳滤工艺，制水成本有所升高，但仍在可持续范围内；当TDS继续升高至1 500~2 000 mg/L时，需采用反渗透工艺方可达标，此时制水成本显著增加，经济性接近临界可持续状态；当TDS>2 210 mg/L时，制水成本将超过现行最高水价(4.16元/m^3)，经济可持续性堪忧。将上述方法应用于我国西北地区某地级市，结果表明，在现有水源条件下，依靠常规工艺仅能使21.46%的人口稳定获得达标水；引入纳滤工艺后，可将此比例提高至58.92%，其余41.08%人口则必须采用成本更高的反渗透工艺来保障饮用水的水质安全。【结论】从原水到制成水的级联全过程是饮用水生产不可分割的链条，所构建的级联组合经济可持续性评价方法可为不同原水水质条件下的制水工艺优化配置和供水水源选择提供科学依据，并可为城乡供水规划和饮用水标准持续提升背景下的供水安全保障提供参考。

关键词：原水水质；饮用水标准；溶解性总固体；制水工艺；经济可持续性；影响因素；供水安全；环境脆弱地区

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.008　　**开放科学(资源服务)标志码(OSID)：**

中图分类号：TV213.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-0860(2026)08-0108-14

听语音 聊科研 与作者互动

收稿日期：2025-10-25；**修回日期：**2026-03-21；**录用日期：**2026-03-30；**网络出版日期：**2026-07-14
基金项目：国家自然科学基金项目(52300246，U2243601)；水圈科学与水利水电工程全国重点实验室(SKL-IOW-2024TC2401)
作者简介：杨翊辰(2000—)，博士研究生，水文水资源及智慧水利方向。E-mail：yangyich24@mails.tsinghua.edu.cn
通信作者：王忠静(1963—)，教授，博士，主要从事水资源规划与管理研究。E-mail：zj.wang@tsinghua.edu.cn
©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Economic sustainability evaluation of cascaded combinations of raw water quality and water treatment processes for drinking water

YANG Yichen[1], LIU Shengjie[2], WANG Zhongjing[1,3], LIU Dan[1], ZHANG Zhenzhong[1], RU Nan[1], JIN Panxin[3]

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Gansu Water Investment Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750026, ningxia, China)

Abstract: [Objective] Against the background of China's comprehensive victory in poverty alleviation and the overall improvement of drinking water safety, the economic sustainability of safe drinking water supply in some water-scarce and environmentally fragile areas, especially brackish-water areas, remains challenging. Existing studies using brackish water as a drinking water source report large differences in water production costs and high uncertainty, mainly because the relationship among raw-water quality, water treatment processes, and drinking water standards has not been studied jointly, and the reported result reflect only one part of the whole process. [Methods] Starting from the complete chain of drinking water production, the whole-process cascaded combination relationship of " raw water quality-water treatment process-drinking water standard" and its economic evaluation model were constructed. Using raw-water total dissolved solids (TDS) as the key indicator, the model systematically analyzed the water production costs of raw water with different TDS concentrations under different treatment processes for meeting different drinking water standards, and then compared them with the current first-tier water prices in major provincial capitals and municipality with independent planning status in China to evaluate the economic sustainability of different cascaded combinations. [Results] Under China's current drinking water standards, when raw-water TDS was ≤1 000 mg/L, conventional treatment or ultrafiltration could stably meet the standard, with low water production cost and strong economic sustainability. When TDS was 1 000~1 500 mg/L, nanofiltration was required, and the cost increased but remained within a sustainable range. When TDS further rose to 1 500~2 000 mg/L, reverse osmosis was required to meet the standard, at which point the water production cost increased significantly and economic sustainability approached a critical threshold. When TDS exceeded 2 210 mg/L, the water production cost exceeded the current highest water price of 4.16 CNY/m^3, and economic sustainability became a concern. Application of the method to a prefecture-level city in northwestern China showed that, under existing source-water conditions, conventional processes alone could provide compliant water to only 21.46% of the population. After introducing nanofiltration, this proportion increased to 58.92%, while the remaining 41.08% must rely on the higher-cost reverse osmosis process to ensure drinking water safety. [Conclusion] The complete cascade from raw water to finished water is an inseparable chain in drinking water production. The proposed economic evaluation method for cascaded combinations can provide a scientific method for configuring different treatment processes and selecting water supply sources for drinking water based on raw-water quality, and can serve as a reference for guiding urban and rural water supply planning and ensuring supply safety against the background of continuously rising drinking water standards.

Keywords: raw water quality; drinking water standards; total dissolved solids; water treatment processes; economic sustainability; influencing factors; water supply safety; environmentally fragile areas

0 引 言

随着我国进入新发展阶段，人们对饮用水安全提出了更高要求，提升和完善饮用水标准与安全保障能力，成为亟待解决的问题之一[1-3]。我国水源类型多样，地表水、地下水与非常规水在水质特征及可处理性方面差异显著。在水资源紧缺地区，溶解性总固体(Total Dissolved Solids, TDS)>1 000 mg/L 的微咸水甚至超过 2 000 mg/L 的苦咸水都被用作生活供水水源，但其适饮性、经济性甚至健康性都饱受争议[4-5]，国内外均有高矿化度水作为饮用水原水的风险报道[6-7]。

苦咸水主要表现为溶解性离子含量高，通常以 TDS 指标表征[8-9]。此类原水难以仅用混凝-沉淀-过滤-消毒等常规处理工艺稳定达标，需采用深度净化工艺如膜过滤技术实现有效脱盐[10-11]。膜过滤分几个层次，微滤常用来处理低浊度地表水，其净水成本 0.05~0.80 元/m^3；超滤常用于农村分散供水或城镇常规水厂，成本区间 0.08~0.35 元/m^3[12-13]；纳滤具有一定的脱盐能力，可用于苦咸水淡化，成本区间 0.3~2.2 元/m^3[14-15]；电渗析常用于低盐度或特定离子去除，成本区间 1.6~7.8 元/m^3[16-17]。反渗透

是目前处理高矿化度原水最为广泛的技术，其成本区间为 1.23~9.33 元/m^3[18-20]。至于膜蒸馏技术，主要应用于海水淡化或特殊工业场景，成本区间 3.5~11.9 元/m^3[21-22]。已有成果关于不同净水工艺的制水成本如图 1 所示。

从图 1 可以看出，微滤、超滤、纳滤的制水成本相对较低，不同文献报道的成果变幅也相对较小，反映出其工艺技术相对成熟和使用环境相对一致。电渗析、反渗透、蒸馏，不仅成本较前三个工艺明显偏高，而且已有文献报道的成果变幅也很大，尤以反渗透为甚，最高最低可差 8 倍。这种巨大的成本偏差在生产实践中造成了规划、设计、生产和决策中的诸多误导，导致“建得起、用不起”“给财政扔下个大包袱”的情况时有发生。制水成本的巨大差异，一方面隐含着该项技术仍在发展中，另一方面也隐含着使用环境的差异性较大，制水成本不仅取决于工艺本身，更取决于原水水质-工艺配置-目标水质-核算口径的组合。

事实上，水处理工艺的效能与运行成本并非固定常数，而对原水盐度、制水工艺和目标水质具有明显依赖性，表现出显著的级联组合特征。原水水质与处理工艺的匹配决定了出水能否达到相应的饮用水标准，制水成本又直接影响安全供水体系的可持续性，而已有成果的成本差异，大多来源于将原水、制水、标准三者割裂开来分析，造成孤立的、片段的经济评价结果。因此，对于原水水质与制水工艺、处理效能与出水水量、出水水质与饮用水标准构成的层层制约、环环相扣的饮用水水质安全保障系统，必须从系统组合的角度分析其在不同组合和工况下的经济性图谱。

综上，本文从系统角度出发，将原水水质-制水工艺-饮用水标准间的级联关系视为一个整体系统，面向供水系统全链路分析其经济性：(1)在不同净水工艺条件下，定量测算原水水质变化对单位制水成本的影响规律；(2)系统刻画原水水质-净水工艺-饮用水标准的级联组合关系，构建对应的工艺适用区间与制水成本图谱；(3)结合我国现行第一阶梯居民生活水价水平，对不同级联组合的经济可持续性进行评价，识别高成本约束条件下供水方案的适用边界。

1 材料与方法

1.1 我国不同行业水质标准与饮用水关系

我国在不同行业、不同用途有着各自的水质标准，涵盖水源保护、饮用水安全、农业灌溉和工业用水等多个领域，但在实践中常被混淆和误用。本文以 TDS 指标为例，按照水源类和用水类两大范畴构建原水-用水水质标准 TDS 指标对应表(见表 1)，以建立其后续的级联关系。

从表 1 可以看出，从原水到用水的链条中存在多种组合。原水相同用途不同时，需处理达到的标准不同；反之，用途相同原水不同时，其所需处理的深度也不同。值得注意的是，原水水质与用水水质类型交叉对应时，其 TDS 指标区间存在重叠。如原水侧《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395—2007)四级水体高于《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020—1993)，也高于用水侧《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。在用水侧，《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)集中式供水 TDS<1 000 mg/L，而农村饮水安全评价准则(T/CHES 18—2018)则规定特殊情况下可放宽至 2 000 mg/L，低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中非盐碱土灌溉水质标准 TDS<1 000 mg/L，隐藏着不可灌溉但可饮用的悖论。标准限值的重叠甚至倒置或是引起水资源配置高质低用的

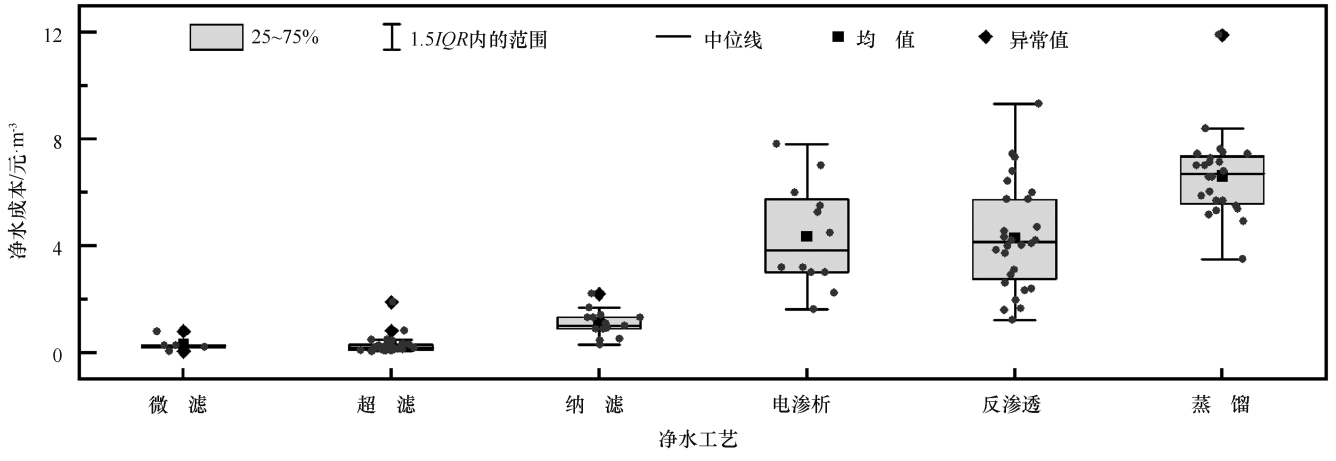


图 1 不同净水工艺制水成本及变幅偏差(来自 70 篇文献统计)

Fig. 1 Costs and variation ranges of water production by different water purification processes (based on statistics from 70 published studies)

原因之一，如图 2 所示。聚焦到饮用水，世卫组织和发达国家的标准普遍在 TDS≤500~600 mg/L，俄罗斯、沙特与我国相同(见表 2)。

从全球范围看，饮用水 TDS 限值与经济水平和

表 1　我国不同行业及用于水质标准 TDS 指标原水-用水对应关系

Table 1　Correspondence between raw water and water-use TDS standards for different industries

原水水质标准		用水水质标准(TDS 阈值/mg·L^{-1})		
标准名称	TDS 阈值/mg·L^{-1}	饮用水水质	农业灌溉用水水质	工业用水
《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395—2007)[23]	四级 500~1 000 五级>1 000	《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)[24]，<1 000 《农村饮水安全评价准则》(T/CHES 18—2018)[25] <1 000， 特殊放宽到<2 000	《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)[26] 非盐碱地<1 000 盐碱地<2 000)	《海水淡化利用工业用水水质标准》(GB/T 39481—2020)[27]，<500 《城市污水再生利用工业用水水质》(GB/T 19923—2024)[28]，<1 000 《工业锅炉水质》(GB/T 1576—2018)[29]，<4 000
《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020—1993)[30]	<1 000			
《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)[31]	Ⅳ类 1 000~2 000 Ⅴ类>2 000			
《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)[32]	无规定			
《高矿化度矿井水处理与回用技术导则》(GB/T 37758—2019)[33]	>1 000			
《海水水质标准》(GB3097—1997)[34]	>32 000			

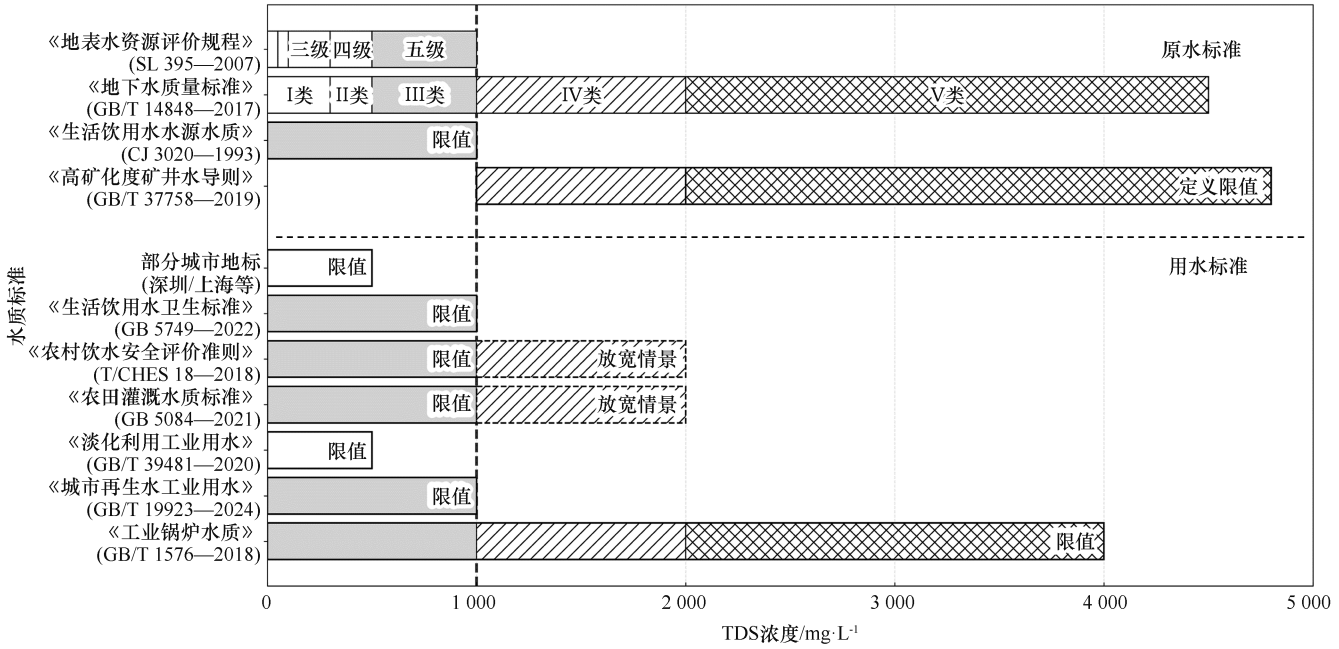


图 2　不同行业水质标准比较示意

Fig. 2　Schematic comparison of water quality standards across different industries

表 2　部分国家、地区和组织关于饮用水的 TDS 标准

Table 2　TDS standards for drinking water in selected countries, regions, and organizations

国家/地区/组织	TDS 建议标准
美国(EPA 二级饮用水标准)	≤ 500 mg/L
加拿大(EPA 二级饮用水标准)	≤ 500 mg/L
德国(TrinkwV 2023)	≤ 500 mg/L
印度(IS 10500：2012)	≤ 500 mg/L，最大允许值 ≤ 2 000 mg/L
世卫组织(Guidelines for Drinking-Water Quality)	≤ 600 mg/L，可接受值 ≤ 1 000 mg/L
日本(参考 WHO 标准)	≤ 600 mg/L
澳大利亚(NHMRC，2011)	≤ 600 mg/L，可接受值 ≤ 1 200 mg/L
俄罗斯(SanPiN 2. 1. 4. 1074-01)	最大允许值 ≤ 1 000 mg/L
沙特阿拉伯(SASO 409/2003)	最大允许值 ≤ 1 000 mg/L

水源条件相关。发达国家标准普遍较高，欠发达国家和缺水地区相对宽松。随着生活水平提高，人们对饮用水品质要求也将提高，这也是健康的高要求。

1.2 原水-制水工艺-制成水水质级联关系

常见的净水工艺有混凝、沉淀、超滤、纳滤、反渗透等，适用于不同离子粒径和 TDS[35-36]。常规工艺只能处理大颗粒，微滤可处理直径大于 1 μm 的大分子，超滤可处理到 0.1 μm，纳滤则可到 0.01 μm。苦咸水中溶解性盐离子多为纳米级，需采用反渗透工艺[7,37]。不同净水工艺处理离子直径如图 3 所示。

不同类型原水的离子组成和 TDS 浓度差异显著[38]，要实现不同的用途，其选择的处理工艺必然不同[39-40]，原水-制成水水质的级联关系可整理如表 3 所列。

1.3 原水-制水工艺-制成水级联成本模型

不考虑建厂成本及其折旧、人工费用，仅就膜处理工艺制水中的能耗和膜耗计算其运行费用，评估其在原水-处理工艺-制成水标准级联组合下的经济性。

电耗是膜处理工艺制水成本的主要部分，与原水 TDS 密切相关[41]。原水 TDS 越高，膜处理所需渗透压越大，运行压力和电耗也就相应增加[11,42]。渗透压与原水 TDS 成正比，其公式为

$$P_{elec} = PR/\eta \times E_{price} \tag{1}$$

$$PR = \Pi \times R_{safe} + \Delta P_{sys} \tag{2}$$

$$\Pi = i \times R \times T \times C_{raw} \tag{3}$$

式中，P_{elec} 为电耗成本(元)；PR 为运行压力(bar)；η 为泵效率；E_{price} 为电价(元/kWh)；Π 为渗透压(bar)；R_{safe} 为安全系数；ΔP_{sys} 为附加压力(bar)；i 为电解质解离数；R 为气体常数；T 为温度(K)；C_{raw} 为溶质浓度(mg/L)。

膜耗成本与 TDS 密切相关。一方面，原水 TDS 升高，膜的使用寿命缩短，更换频率增加；另一方面，高 TDS 下膜污染和结垢加剧，清洗频次增加，运维费相应提高[41]。在两个方面的综合影响下，膜耗成本随原水 TDS 增大而快速增大。其公式为

$$P_{mem} = P_{base} \times e^{C_{raw}} \tag{4}$$

式中，P_{mem} 为膜耗成本；P_{base} 为单位产水的膜更换成本(元/m^3)；C_{raw} 为溶质浓度(mg/L)。

产水率是制水成本的另一个高敏感参数[43]。在高 TDS 条件下，产水率通常控制在 30%~50%，且随着原水离子浓度升高而下降。产水率 R_{prod} 定义为

$$R_{prod} = \frac{C_{con} - C_{raw}}{C_{con} - C_p} \times 100\% \tag{5}$$

式中，C_{con} 为浓水浓度(mg/L)；C_{raw} 为原水浓度(mg/L)；C_p 为制成水浓度(mg/L)。

综合式(1)—式(5)，可得制水成本

$$P_{treat} = P_{elec} + P_{mem} \tag{6}$$

$$P_{prod} = P_{treat}/R_{prod} \tag{7}$$

式中，P_{treat} 为原水净化成本(元/m^3)；P_{prod} 为制成

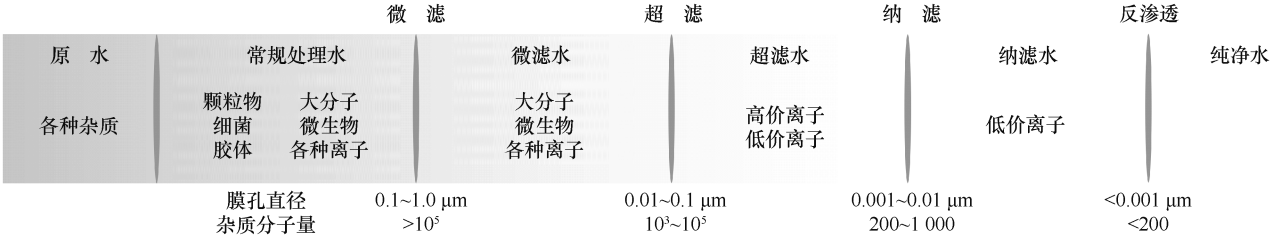


图 3 基于膜工艺的级联关系

Fig. 3 Cascade relationship based on membrane processes

表 3 不同处理工艺供水系统的原水-制成水级联组合

Table 3 Cascaded combinations of raw water and treated water in water supply systems using different treatment processes

原水 TDS/mg·L^{-1}			制成水 TDS/mg·L^{-1}						
水 源	主要离子组成	浓度范围	常 规	微 滤	超 滤	纳 滤	电渗析	反渗透	蒸 馏
河流水	Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-	100~800	99~792	99~792	95~792	20~400	10~480	0~80	0~8
湖泊水	Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}	100~800	99~792	99~792	95~792	20~400	10~480	0~80	0~8
浅层地下水	Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-	300~1 500	297~1 485	297~1 485	285~1 485	60~750	30~900	1~150	0~15
深层地下水	Na^+, Cl^-, NO_3^-	800~3 000	792~2 970	792~2 970	760~2 970	160~1 500	80~1 800	2~300	1~30
矿井水	Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}, F^-	1 000~5 000	990~4 950	990~4 950	950~4 950	200~2 500	100~3 000	3~500	1~50
苦咸水	Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}	2 000~8 000	1 980~7 920	1 980~7 920	1 900~7 920	400~4 000	200~4 800	6~800	2~80
海水	Na^+, Cl^-	32 000~38 000	31 680~37 620	31 680~37 620	30 400~37 620	6 400~19 000	3 200~22 800	96~3 800	32~380

水成本(元/m^3)。

由于膜法过滤的制成水纯度较高，生产实践中通常会采用在制成水中混掺一定量的原水方法以刚好达到饮用水水质标准限值，同时也降低成本。混掺后制水成本 P_{blend} 可表示为

$$P_{blend} = (1 - R_{blend}) \times P_{prod} \quad (8)$$

$$R_{blend} = \frac{C_{stand} - C_p}{C_{raw} - C_p} \times 100\% \quad (9)$$

式中，R_{blend} 为可掺原水比例；C_{stand}、C_{raw}、C_p 分别为水质标准浓度、原水浓度、制成水浓度(mg/L)。

1.4 原水-制水工艺-制成水经济性评价模型

饮用水原水-制水工艺-目标水质级联组合后的制水成本是否经济可持续，不仅是工程经济核算问题，更要与当前经济社会发展水平通盘衡量，以计入政府补贴和社会稳定等因素。本文以国内省会城市和主要计划单列市的第一阶梯水价(不含污水处理费，见表4)为参考，提出了饮用水水价的经济可持续性评价方法及分区阈值，如表5所列。

表5显示，当制水成本低于各大城市水价中位数时，有较大盈利空间，认为强可持续；在50%~75%分位数时，划为可持续范围；当制水成本上升至75%~100%分位数时，考虑到社会因素和政府补贴，划为基本可持续范畴。当超过全国主要城市最高水价时，虽可通过涨价消化部分成本，但也会引发社会矛盾，多数靠加大财政补贴解决、压力增大，划为弱可持续；当超过1.5倍最高水价时，成本畸高，定义为基本不可持续；当超过2倍最高水价时，社会认同和财政压力都难以接受，定义为完全不可持续。

2 结 果

2.1 不同净水工艺下原水水质与制水成本测算结果

对式(1)—式(7)的泵效率按《离心泵 效率》(GB/T 13007—2011)[42]推荐值0.74、电价采用国家发展改革委2025年公布的平均值0.63元/kWh、膜耗成本采用文献[45-47]数据、产水率参数基于文献[48]数据测算，可以得到纳滤及反渗透工艺在不同原水水质下仅考虑能耗和膜耗的制水成本曲线(见图4)。

2.2 原水-净水工艺-目标水质标准级联组合成本图谱

如图4所示的成本，是考虑了产水率后的单方制成水成本，隐含着制成水的TDS水平，其浓度通常明显优于饮用水水质标准，生产上常通过混掺一定比例的原水，在满足水质标准的前提下降低成本。按式(8)—式(9)掺混后，可得原水-净水工艺-目标水质级联的制水成本曲线；与表5结合，可得原水-净水工艺-目标水质级联组合的经济性图谱(见图5)。

从图5不难看到，在目标水质TDS=1 000 mg/L情况下，当原水浓度低于1 960 mg/L时，净水成本保持在3.25元/m^3以下的强可持续区间；当原水浓度在1 960~2 070 mg/L时，成本可保持在3.63元/m^3以下的可持续区间；当原水浓度上升到2 070~2 210 mg/L时，成本在4.16元/m^3以下的基本可持续区间；当原

表4 我国主要省会城市和计划单列市第一阶梯水价(不含污水处理费)[44]

Table 4 First-tier water prices in major provincial capital cities and municipality with independent planning status in China (excluding sewage treatment fees)[44]

城 市	乌鲁木齐	天 津	上 海	郑 州	宁 波	合 肥	济 南	长 春	深 圳
水 价	4.16	4.11	4.05	4.05	4.00	3.80	3.80	3.80	3.67
城 市	青 岛	石家庄	北 京	重 庆	哈尔滨	银 川	沈 阳	大 连	太 原
水 价	3.50	3.45	3.43	3.40	3.35	3.31	3.30	3.25	3.25
城 市	西 安	呼和浩特	海 口	南 京	西 宁	福 州	成 都	长 沙	贵 阳
水 价	3.25	3.22	3.15	3.15	3.12	3.10	3.05	3.03	2.90
城 市	杭 州	南 宁	兰 州	南 昌	广 州	武 汉	拉 萨		
水 价	2.90	2.90	2.82	2.70	2.62	2.55	2.47		

表5 可持续等级及水价区间

Table 5 Economic sustainability levels and water price ranges

水价区间	可持续性等级	解 释	对应水价阈值
中位数以下	强可持续	成本低于各大城市水价中位数，可形成资金积累	<3.25
50%~75%分位数	可持续	成本位于各大城市水价1/2~3/4区间，可财务平衡	3.25~3.63
75%~100%分位数	基本可持续	成本位于各大城市水价1/4高位区间，水价高企	3.63~4.16
1.0~1.5倍最高水价	弱可持续	成本超过各大城市最高水价，需持续补贴维持运营	4.16~6.24
1.5~2.0倍最高水价	基本不可持续	成本超过城市最高水价1.5倍，资金缺口难以为继	6.24~8.32
2倍最高水价以上	完全不可持续	成本超过城市最高水价1.5倍，不具备经济可行性	>8.32

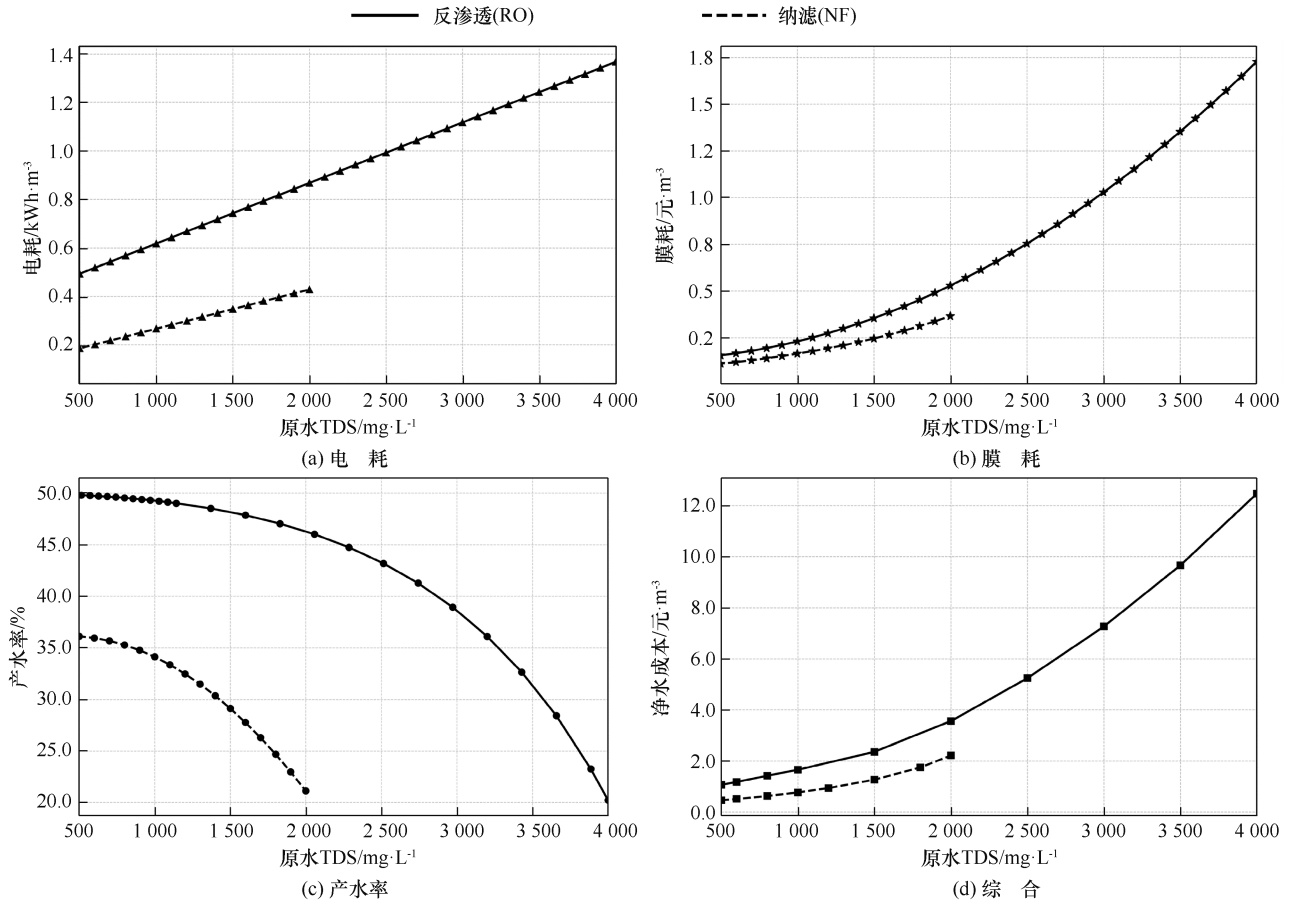


图 4　纳滤和反渗透处理不同 TDS 原水的制成水成本

Fig. 4　Cost of treated water produced by NF and RO from raw water with different TDS concentrations

水浓度超过 2 210 mg/L，净水成本将超过 4.16 元/m^3，进入弱可持续区间；当原水浓度达到 2 750 mg/L，净水成本将达到 6.24 元/m^3，进入基本不可持续区间；当原水浓度达到 3 290 mg/L 时，净水成本将超过 8.32 元/m^3，进入完全不可持续区间。在制成水 TDS<500 mg/L 的目标水质要求下，净水工艺的经济可持续空间进一步收窄，基本可持续空间收窄至 1 900 mg/L，不可持续区间提前至 2 880 mg/L。

3　应　用

3.1　研究区原水水质

西北地区 QY 市位于黄土高原中部，为丘陵沟壑区，市域面积 2.71 万 km^2，多年平均年降水量 400~600 mm，潜在蒸发量 1 200~1 400 mm。市域内主要河流有 MLH、HJ、RH、PH 等，总水资源量 8.01 亿 m^3。其中，MLH 为最大的河流，占区域径流总量的 59.28%。但因受石膏、岩盐等矿物溶滤影响，矿化度高，TDS 可达 10 000 mg/L 以上。当地主要河流的 TDS、硫酸盐、铬离子、氟化物等指标浓度及综合超标河段分布如图 6 所示。

如图 6(a)所示，HJ 上游及 CJM 水库下游河段 TDS 出现显著高值，浓度高达 11 158 mg/L，超过生活饮用水水源水质标准 11.16 倍；如图 6(b)所示，HJ、MLH 及其支流硫酸盐超标，超标河段长度占比达 35.53%，其中，HJ 最为严重，最高达 2 780 mg/L，超出标准 11.12 倍；如图 6(c)所示，HJ 与 MLH 均有不同程度的铬离子超标，超标河段 24.45%，其中，HJ 上游最高浓度达 0.18 mg/L，超标 3.6 倍；如图 6(d)所示，大部分河段氟化物浓度尚好，仅 HJ 上游个别河段超标，最高值 2.12 mg/L，为标准限值的 2.12 倍。

3.2　净水成本及经济性分布

基于上述条件，分析原水-制水工艺-目标水质级联组合下制成(混掺)水覆盖人口比例，如图 6(e)所示。结果表明，在采用常规制水工艺下，QY 市将有 183.87 万人饮用不达标的苦咸水，占总人口比例的 78.54%；采用纳滤工艺下，仍有 96.16 万人口饮水水质不达标，占总人口的 41.08%，须采用反渗透工艺才能解决。根据图 4—图 6，综合计算可得各县

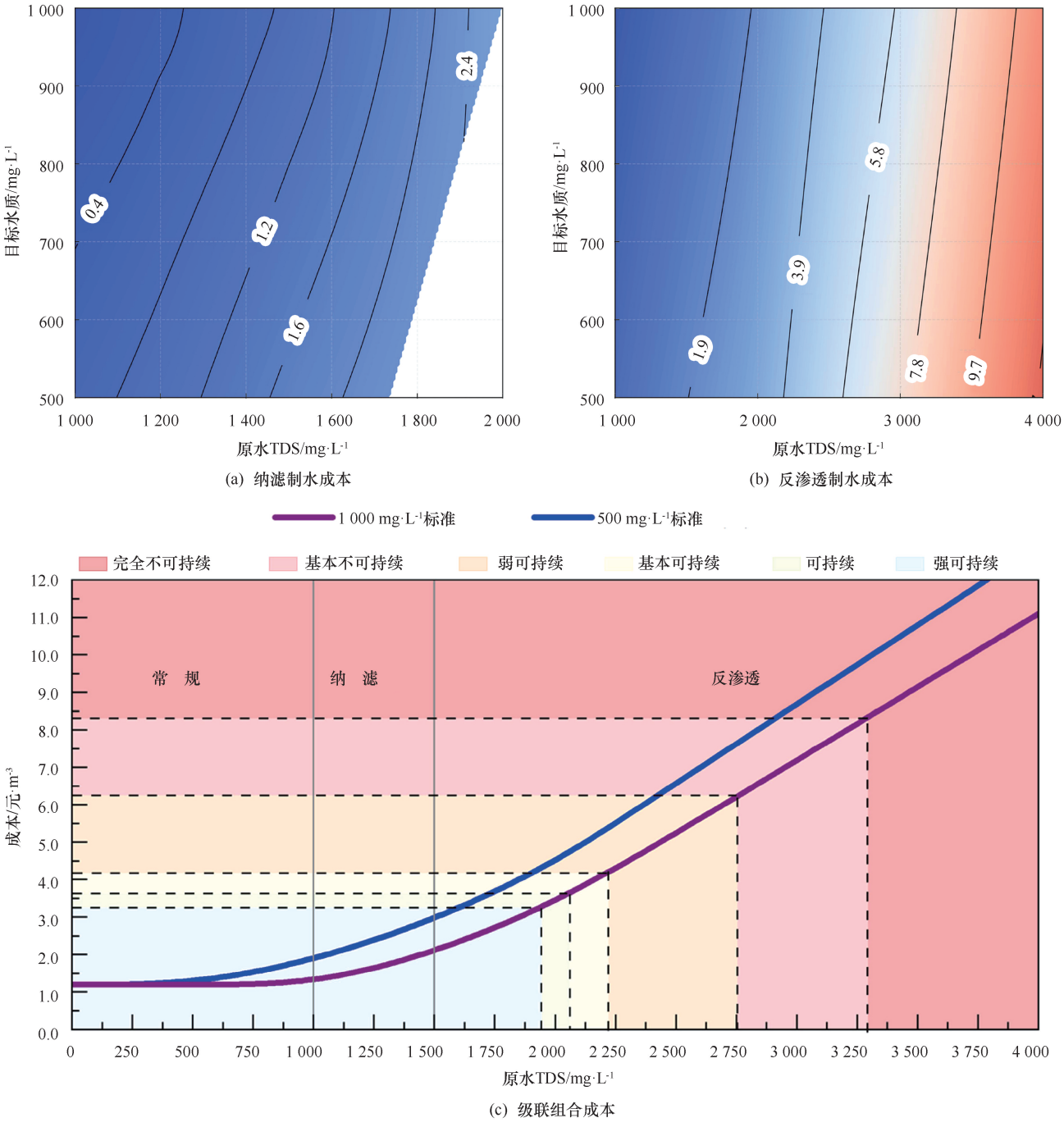


图 5　原水–净水工艺–目标水质级联组合经济性图谱

Fig. 5　Economic mapping of cascaded combinations of raw water, water purification processes, and target water quality

区水制水成本及其经济可持续性，结果如表 6 所列。

将表 6 与图 5 综合，绘制 QY 市制水经济性覆盖人口及可持续性分区(见图 7)。总体看，QY 市以当地水为饮用水水源，其制水成本位于十分不利的经济性区间。仅考虑能耗成本和膜耗成本，其供水经济性处于弱可持续及以下的覆盖人口将达到 47.37 万人，占总人口比例的 34.52%。即使是在可持续范围的，强可持续仅覆盖 30.27%，均因其原水水质较好，采用纳滤工艺即可达标。

4　讨　论

4.1　苦咸水制备饮用水案例还原

回溯文献所涉及 RO 的制水成本差异，将其输入本文模型补全计算，可得结果(见表 7)。结果表明，若将原文献所述制水按原水水质–制水工艺–制成水标准全链条级联后，其成本均有不同程度的提高。特

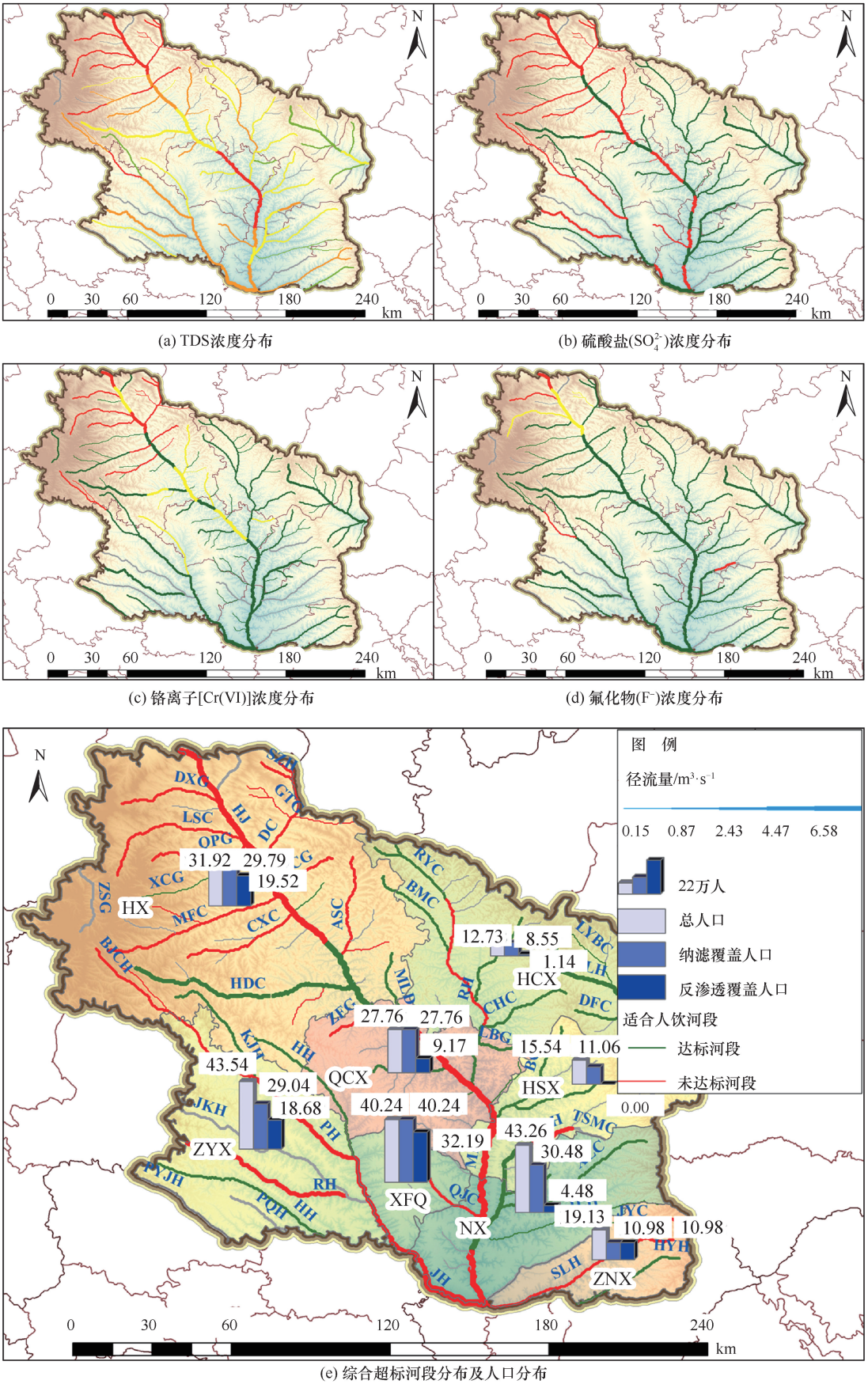


图 6　某市河流水质及超标人口数量分布

Fig. 6　Distribution of river water quality and population exposed to water exceeding standard in city

表 6　QY 市基于当地水源的饮用水净水成本及覆盖人口

Table 6　Drinking water purification costs and population coverage in QY City based on local water sources

县　区	原水矿化度/mg·L^{-1}	主要净水工艺	净水成本/元	掺混后成本/元	覆盖人口/万人
HS 县	1 542	纳　滤	2. 46	2. 16	11. 06
N 县	1 598	纳　滤	2. 59	2. 30	30. 48
XF 区	2 058	反渗透	3. 76	3. 59	36. 21
ZN 县	1 979	反渗透	3. 51	3. 31	10. 98
HC 县	2 169	反渗透	4. 13	4. 00	1. 14
ZY 县	2 258	反渗透	4. 43	4. 33	18. 68
QC 县	2 877	反渗透	7. 52	6. 72	9. 17
H 县	3 942	反渗透	11. 88	10. 88	19. 52

别是在原水 TDS>2 000 时，其成本较原报告成本大幅增加，回归本真。上述结果充分说明，本文模型可有效消除不同文献在边界条件、核算口径与工艺环节上的差异，能够在统一框架下实现对净水工艺成本的合理预测与对比分析，验证了该模型具有良好的实用性与可靠性。

4.2　苦咸水制备饮用水典型案例

苦咸水制备饮用水在世界范围内已有许多案例，毁誉参半。例如，中东能源富集国依托充足的油气资源，无需担忧能源消耗成本，大规模采用反渗透、纳滤等成熟工艺，对境内的苦咸水资源进行规模化处理，满足国内居民与产业的用水需求[54]；以色列作为极端缺水国家，凭借先进的节水与净水技术，优化苦咸水净化工艺，缓解了水资源短缺的困境[55]。

与成功案例形成鲜明对比的是，新加坡凯发集团(Hyflux)的苦咸水海水淡化崩盘。该集团曾以远低于实际成本的 0. 35 新元/m^3(约 1. 89 元/m^3)中标新加坡大泉项目，但真实投资与运维成本远高于中标价格，2018 年前三季度净亏达 11 亿新元，最终资不抵债，2021 年被司法清盘。这个案例被哈佛大学商学院选为典型案例(https：//hbsp. harvard. edu/product/NTU243-PDF-ENG)，提醒成本核算必须完整、全链条。此外，还有很多其他失败案例，例如，非洲国家引入发达国家的高端苦咸水净化技术，却因自身能源短缺、资金不足，无法承担设备运维与能源消耗的高额成本，项目建成后无法正常运行，最终闲置废弃[56]；我国部分农村苦咸水净水项目建成后不久便因资金短缺而停止运行[57]。

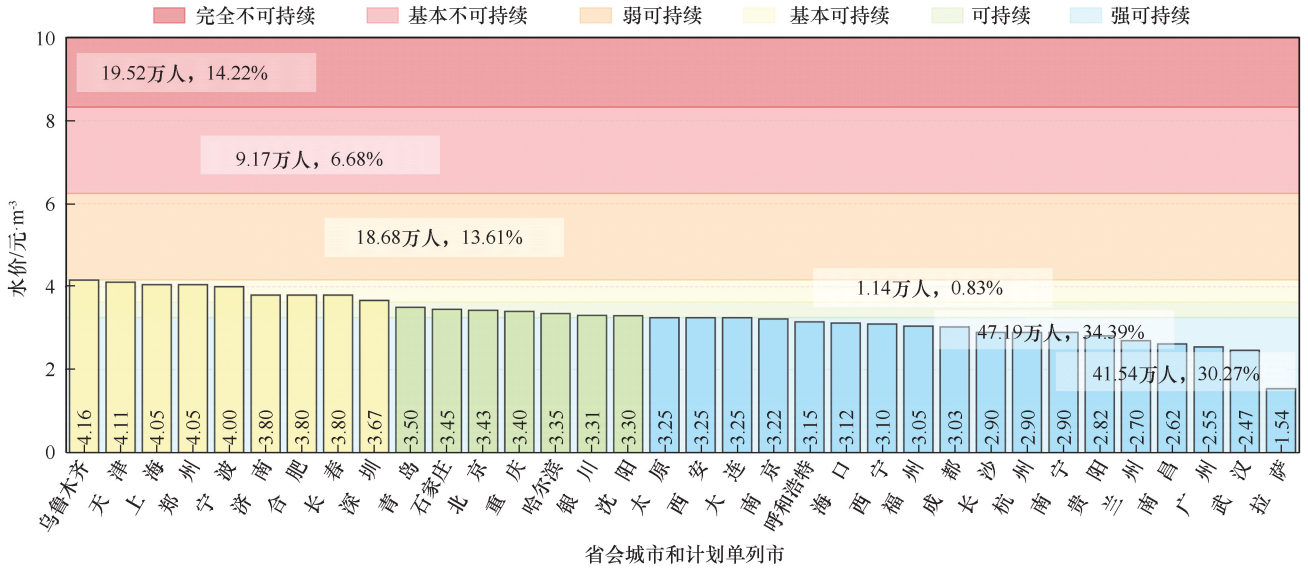


图 7　QY 市基于本地原水的饮用水制水成本、覆盖人口及其经济可持续性评价

Fig. 7　Drinking water cost, population coverage, and economic sustainability in QY city

表 7　基于现有文献的还原结果

Table 7　Reproduced results based on existing literature

原水 TDS 浓度/mg·L^{-1}	文献成本/元·m^{-3}	文献口径	本模型修正后成本/元·m^{-3}	文献来源
1 400	1. 39	未考虑膜耗	1. 97	[49]
2 150	1. 60	未考虑膜耗	3. 72	[50]
2 250	2. 19	未考虑产水率	4. 12	[51]
2 480	1. 65	未考虑膜耗、产水率	5. 13	[52]
3 060	1. 32	未考虑产水率	7. 08	[53]

4.3 苦咸水制备饮用水成败启示

本地高矿化度水源虽具备就地取水、工程建设相对简便等优势，但在长期供水经济性与综合保障安全性方面存在显著局限。本研究仅核算了净水厂的部分运维成本，而在实际工程中，仍有多项隐性成本尚未纳入，其中就包括行业内普遍存在的浓水处置问题。此外，净水厂一般只能实现饮用水水质达标，难以从根本上消除高矿化度水源对区域工农业生产、生态环境及长期人居健康带来的系统性约束。从经济可行性角度对比，当外调水原水 TDS<1 000 mg/L 且成本不超过 2.0 元/m^3 时，加上水厂处理费用，其经济性为强可持续；当调水成本不超过 2.4 元/m^3，为可持续；当达到我国调水工程原水水价的最高范围 2.9 元/m^3 时，为基本可持续[58]。可见，区域饮用水安全保障不宜过度依赖单一本地高矿化水深度处理方案，应以成本阈值为参考，统筹多元水源配置，构建更经济、可靠且可持续的供水格局。

5 结 论

本文系统分析了膜处理工艺制水成本的经济性，以典型地区开展实证研究，主要结论如下。

(1)饮用水制水成本不仅与制水工艺有关，更是原水水质-制水工艺-目标水质标准级联组合的系统性问题。因此，评估饮用水供水系统的经济性，必须从三者级联组合角度出发，分析影响制水成本的全链路过程，方能得到正确可靠的成本效益评价结果。

(2)以水质 TDS 指标为例，当原水 TDS 低于 1 000 mg/L 时，常规或超滤工艺即可实现经济可行供水；在 1 000~1 500 mg/L 区间时，需引入纳滤工艺，经济上基本可行；超过 1 500 mg/L 时，则需采用反渗透工艺，经济性显著下降；超过 2 210 mg/L 时，在当前技术水平和社会环境下，其供水经济性趋于不可持续。

(3)我国西北黄土高原 QY 市典型案例分析发现，若基于当地水资源条件，在现行饮用水水质标准下，常规工艺仅可保障 21.46%人口饮水安全，纳滤工艺将提升这一比例至 58.92%，其余 41.08%人口只能依赖反渗透工艺，相应的制水成本(不含水资源费、人工、折旧及污水处理费)将高达 10.88 元/m^3，超过当前我国省会城市的最高水价，经济不可持续性显著，宜考虑寻找新的水源。

参考文献(References)：

[1] WANG T, SUN D L, ZHANG Q, et al. China's drinking water sanitation from 2007 to 2018: a systematic review[J]. Science of the Total Environment, 2021, 757: 143923.

[2] ZHU Y Q, JIAO X Q, MENG W J, et al. Drinking water in rural China: water sources, treatment, and boiling energy [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(16): 6465-6473.

[3] 邢澳琪，靖争，窦明，等. 开放性水库突发镉污染迁移过程模拟及污染风险评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2025，23(6)：1510-1521.
XING A Q, JING Z, DOU M, et al. Migration process simulation and pollution risk assessment of sudden cadmium pollution in open reservoirs[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(6): 1510-1521.

[4] DEVESA R, DIETRICH A M. Guidance for optimizing drinking water taste by adjusting mineralization as measured by total dissolved solids (TDS)[J]. Desalination, 2018, 439: 147-154.

[5] FAN W, ZHOU J L, ZHENG J H, et al. Hydrochemical characteristics, control factors and health risk assessment of groundwater in typical arid region Hotan Area, Chinese Xinjiang[J]. Environmental Pollution, 2024, 363: 125301.

[6] 王程，敬小兰，李敏，等. 2016—2021 年黄土高原马莲河干流水质时空变化特征及其成因[J]. 水土保持通报，2022，42(5)：158-164.
WANG C, JING X L, LI M, et al. Spatiotemporal variation and causes of water quality in the mainstream of Malian river on the loess plateau from 2016 to 2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 158-164.

[7] MEDINA-TOALA A N, VALVERDE-ARMAS P E, MENDEZ-RUIZ J I, et al. Brackish water desalination using electrodialysis: influence of operating parameters on energy consumption and scalability[J]. Membranes, 2025, 15(8): 227.

[8] 戴向前，刘昌明，李丽娟. 我国农村饮水安全问题探讨与对策[J]. 地理学报，2007(9)：907-916.
DAI X Q, LIU C M, LI L J. Discussion and countermeasures on safe drinking water in the rural areas of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2007(9): 907-916.

[9] 董文明，何金春，穆哈西，等. 三环追压非等灌对枸杞根系湿润体盐分的影响[J]. 排灌机械工程学报，2024，42(9)：948-956.
DONG Wenming, HE Jinchun, MU Haxi, et al. Effect of three-ring pressure and unequal irrigation on salt content of root moist body of Lyceum Barbarum[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(9): 948-956.

[10] TAYEH Y A. A comprehensive review of reverse osmosis desalination: Technology, water sources, membrane processes, fouling, and cleaning[J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 320: 100882.

[11] GHOSAL P, SAHU S, PATEL H, et al. A comprehensive review on desalination using membrane-based technologies in India: A bibliometric analysis and meta-analysis [J]. Desalination, 2025, 598: 118418.

[12] 雷晓玲，陈麟，杨程，等. 直接超滤在重庆村镇安全供水中的工程实践[J]. 中国给水排水，2019，35(22)：76-82.

LEI X L, CHEN L, YANG C, et al. Engineering practice of direct ultrafiltration in safe water supply of villages and towns in Chongqing [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 76-82.

[13] 郑兴, 吴林杰, 曹昕, 等. 膜组件选取的指标体系与中试框架: 以欧洲超滤应用为例[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 11-16.
ZHENG X, WU L J, CAO X, et al. Index system for the selection of membrane modules and pilot framework: take European ultrafiltration application as an example[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 11-16.

[14] 段冬, 张增荣, 芮旻, 等. 纳滤在国内市政给水领域大规模应用前景分析[J]. 给水排水, 2022, 58(3): 1-5.
DUAN D, ZHANG Z R, RUI M, et al. Analysis on the application prospect of nanofiltration in domestic municipal water supply field [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(3): 1-5.

[15] 陈燚, 胡淑圆, 笪跃武, 等. 给水厂既有生产工艺与超滤-纳滤中试组合运行探索[J]. 给水排水, 2025, 61(5): 7-13.
CHEN Y, HU S Y, DA Y W, et al. Exploration on the combined operation of water treatment plant existing production process and ultrafiltration-nanofiltration pilot system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 61(5): 7-13.

[16] 余超, 刘飞峰, 徐龙乾, 等. 新型电渗析工艺的技术发展与应用[J]. 工业水处理, 2021, 41(1): 30-37.
YU C, LIU F F, XU L Q, et al. Development and application of new electrodialysis technologies[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(1): 30-37.

[17] ZHANG Y J, CHEN W R, PENG C. Efficient high-rate brackish water desalination via solid-electrolyte-assisted flow-electrode capacitive deionization[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 361: 131523.

[18] 曹伟新. 基于能耗和膜耗的反渗透海水淡化系统的成本分析[J]. 给水排水, 2020, 56(8): 73-79.
CAO W X. Cost evaluation based on energy and membrane consumption for seawater reverse osmosis system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(8): 73-79.

[19] ZHU Y Y, MILLER C, LIAN B Y, et al. Brackish groundwater desalination by constant current membrane capacitive deionization (MCDI): results of a long-term field trial in Central Australia[J]. Water Research, 2024, 254: 121413.

[20] 刘娟, 田军仓. 宁夏地区地下苦咸水人饮淡化技术适宜性研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 5-10.
LIU J, TIAN J C. Research on the suitability of underground brackish water desalination technology for drinking in Ningxia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3): 5-10.

[21] 李红宾, 李腾飞, 石文英, 等. 膜蒸馏组合工艺研究进展[J]. 水处理技术, 2022, 48(6): 24-29.
LI H B, LI T F, SHI W Y, et al. Research and application progress of membrane distillation combined process[J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(6): 24-29.

[22] NARAYANAN A, PAVAN T, NAGARAJ K K, et al. Electrochemical elegance: A review on capacitive deionization for fluoride and arsenic mitigation in brackish water[J]. Electrochimica Acta, 2024, 503: 144875.

[23] 中华人民共和国水利部. 地表水资源质量评价技术规程: SL/T 395—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Ministry of Water Resources. Technical Regulations for Surface Water Resources Quality Assessment: SL/T 395—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for Drinking Water Quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[25] 中国水利学会. 农村饮水安全评价准则: T/CHES 18—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
China Water Conservancy Association. Evaluation Criteria for Rural Drinking Water Safety: T/CHES 18—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[26] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Irrigation Water Quality: GB 5084—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 海水淡化利用 工业用水水质: GB/T 39481—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seawater Desalination Utilization—Water Quality for Industrial Use: GB/T 39481—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市污水再生利用 工业用水水质: GB/T 19923—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses: GB/T 19923—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[29] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 工业锅炉水质: GB/T 1576—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Water Quality for Industrial Boilers: GB/T 1576—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[30] 中华人民共和国建设部. 生活饮用水水源水质标准: CJ/T 3020—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Water Quality Standard for Drinking Water Sources: CJ/T 3020—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.

[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and

Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for Groundwater Quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[32] 国家环境保护总局，国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准：GB 3838—2002[S]. 北京：中国标准出版社，2002.
State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental Quality Standards for Surface Water: GB 3838—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[33] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 高矿化度矿井水处理与回用技术导则：GB/T 37758—2019[S]. 北京：中国标准出版社，2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical Guidelines for the Treatment and Reuse of Mine Water with High TDS: GB/T 37758—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[34] 中华人民共和国生态环境部. 海水水质标准：GB 3097—1997[S]. 北京：中国标准出版社，1997.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Sea Water Quality Standard: GB 3097—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.

[35] HONARPARVAR S, ZHANG X, CHEN T Y, et al. Modeling technologies for desalination of brackish water: Toward a sustainable water supply[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2019, 26: 104-111.

[36] MIRZADEH S S, AMIRINEJAD M. Surface water treatment for production of potable water by coagulation/filtration/nanofiltration membranes hybrid system[J]. Water Environment Research, 2021, 93(8): 1391-1401.

[37] EBRAHIMZADEH S, WOLS B, AZZELLINO A, et al. Quantification and modelling of organic micropollutant removal by reverse osmosis (RO) drinking water treatment[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 42: 102164.

[38] GRAY S, SEMIAT R, DUKE M, et al. Seawater use and desalination technology [M]//WILDERER P. Water-Quality Engineering: Vol. 4. Amsterdam: Elsevier, 2011: 73-109.

[39] AHMED M A, MAHMOUD S A, MOHAMED A A. Nanomaterials-modified reverse osmosis membranes: a comprehensive review[J]. RSC Advances, 2024, 14(27): 18879-18906.

[40] GAO W F, WANG Z Q, DUAN F, et al. Comprehensive assessment of membrane technology for typical water treatment processes: a critical review[J]. Desalination, 2025, 614: 119171.

[41] AHDAB Y D, LIENHARD J H. Desalination of brackish groundwater to improve water quality and water supply[M]//MUKHERJEE A, SCANLON B R, AURELI A, et al. Global Groundwater: Source, Scarcity, Sustainability, Security, and Solutions. Amsterdam: Elsevier, 2021: 559-575.

[42] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，国家标准化管理委员会. 离心泵 效率：GB/T 13007—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Centrifugal pumps—Efficiency: GB/T 13007—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[43] 颉亚玮，徐振峰，裘嘉琪，等. 纳滤膜去除水中有机物及提高产水率的生产性试验[J]. 中国给水排水，2023，39(7)：29-34.
XIE Y W, XU Z F, QIU J Q, et al. Productive test on nanofiltration membrane to remove organic matter from water and improve water production rate[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 29-34.

[44] 马俊，戴向前，周飞，等. 数说我国城镇居民生活水价[J]. 水利发展研究，2022，22(7)：8-13.
MA J, DAI X Q, ZHOU F, et al. Domestic water price of urban residents in China as demonstrated by data[J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(7): 8-13.

[45] 沈利清，徐百龙，范海东，等. 超滤+纳滤组合工艺深度处理饮用水的中试研究[J]. 给水排水，2023，59(S2)：573-578.
SHEN L Q, XU B L, FAN H D, et al. A pilot study of UF+NF membrane process for advanced drinking water treatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(S2): 573-578.

[46] 赵丽红，郭佳艺. 膜分离技术在再生水中的应用及膜污染研究进展[J]. 科学技术与工程，2021，21(19)：7874-7883.
ZHAO L H, GUO J Y. The application of membrane separation technology in reclaimed water and the progress of membrane fouling research[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 7874-7883.

[47] 李毓亮，金焱，张兴文. 反渗透膜污染过程与膜清洗的试验研究[J]. 水处理技术，2010，36(3)：46-48.
LI Y L, JIN Y, ZHANG X W. Experimental study on reverse osmosis membrane fouling process and membrane cleaning[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(3): 46-48.

[48] 苏慧超，李逢时，徐国荣，等. 反渗透海水淡化系统混合膜设计[J]. 净水技术，2024，43(1)：132-139.
SU H C, LI F S, XU G R, et al. Hybrid membrane inter-stage design for RO seawater desalination system [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 132-139.

[49] 张凯，刘波，曹大正，等. 农村苦咸水淡化设备的经济与管理分析[J]. 中国农村水利水电，2009(3)：80-82.
ZHANG K, LIU B, CAO D Z, et al. Economic and management analysis of rural brackish water desalination equipment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(3): 80-82.

[50] 潘春佑，李露，刘筱昱，等. 苦咸水淡化工程系统设计[J]. 净水技术，2016，35(S1)：134-136.
PAN C Y, LI L, LIU X Y, et al. Design of underground water desalination engineering system[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(S1): 134-136.

[51] 陈晓英，赵后昌，王龙滨，等. 双级纳滤在地表高度苦咸水淡化工程中的应用[J]. 膜科学与技术，2013，33(5)：63-67.
CHEN X Y, ZHAO H C, WANG L B, et al. Application of two-stage nanofiltration in desalting of high degree brackish water [J].

Membrane Science and Technology, 2013, 33(5): 63-67.

[52] 杨景天, 赵虎群, 贺全红. 反渗透技术在农村苦咸水淡化工程中的应用[J]. 甘肃科技, 2016, 32(4): 25-29.
YANG J T, ZHAO H Q, HE Q H. Application of reverse osmosis technology in rural brackish water desalination projects[J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32(4): 25-29.

[53] 王文正, 张鹏, 王庚平. 纳滤膜技术在甘肃农村安全饮水工程中的应用[J]. 给水排水, 2011, 47(S1): 28-30.
WANG W Z, ZHANG P, WANG G P. Application of nanofiltration membrane technology in rural safe drinking water projects in Gansu[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(S1): 28-30.

[54] JONES E, QADIR M, van VLIET M T H, et al. The state of desalination and brine production: A global outlook[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 1343-1356.

[55] TAL A. Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the Drylands[J]. Water Research, 2016, 90: 387-394.

[56] MCEVOY J, WILDER M. Discourse and desalination: potential impacts of proposed climate change adaptation interventions in the Arizona-Sonora border region[J]. Global Environmental Change, 2012, 22(2): 353-363.

[57] 冯丽琼. 农村饮水工程长效运行管理机制存在的问题与优化路径探讨[J]. 江西农业, 2026(1): 112-114.
FENG L Q. Discussion on existing problems and optimization paths of long-term operation and management mechanism of rural drinking water projects[J]. Jiangxi Agriculture, 2026(1): 112-114.

[58] 刘丹, 刘生杰, 廖君霞, 等. 我国典型大型跨流域调水工程的经济性再分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(5): 1047-1058.
LIU D, LIU S J, LIAO J X, et al. Economy reanalysis of typical large-scale inter-basin water transfer projects in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(5): 1047-1058.

（责任编辑　王海锋）